

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Приладобудівний факультет

(повна назва інституту/факультету)

Прилади та системи орієнтації і навігації

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»

УДК 629.7:617.57

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ” 20 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації)

(код і назва спеціальності)

151. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

на тему: Комп'ютерно-інтегрована інерціальна система

захоплення руху людини

Виконав (-ла): студент (-ка) 6 курсу, групи ПГ-61М

(шифр групи)

Літош Антон Михайлович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник ас. к.т.н. Лакоза С.Л.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант

(назва розділу)

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент

(підпис)

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Факультет _____ Приладобудівний _____
(повна назва)

Кафедра _____ Приладів і систем орієнтації та навігації _____
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою

Спеціалізація 151. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології _____
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

_____ (підпис) _____ (ініціали, прізвище)

«___» _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту**

_____ Літошу Антону Михайловичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Комп'ютерно-інтегрована інерціальна система захоплення руху людини _____

науковий керівник дисертації Лакоза С.Л., к.т.н., _____,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «___» _____ 20__ р. № _____

2. Строк подання студентом дисертації 15 травня 2018 року _____

3. Об'єкт дослідження Інерціальна система захоплення руху людини _____

4. Предмет дослідження Підвищення точності та завадостійкості алгоритмів оцінки орієнтації об'єктів та системи захоплення руху людини, калібрування та врахування особливостей математичної моделі датчиків інерціального вимірювального блоку _____

5. Перелік завдань, які потрібно розробити 1.) Огляд систем захоплення руху, опис основних принципів, коротка характеристика. _____
2.) Аналіз алгоритмів орієнтації, що використовують інерціальні датчики. _____

- 3.) Вибір базового алгоритму орієнтації, опис його мат. моделі _____
- 4.) Розробка питань підвищення завадостійкості при визначенні орієнтації на основі сигналів гіроскопів, акселерометрів та магнітометрів. Синтез оригінального алгоритму орієнтації. Пропрацювання питань підвищення точності алгоритму на різних режимах роботи. _____
- 5.) Калібрування датчиків, експериментальна перевірка розроблених макетів. _____
- 6.) Розробка макету власної інерціальної системи захоплення руху людини _____

6. Орієнтовний перелік ілюстративного (графічного) матеріалу блок-схеми, графіки модельних та натурних досліджень, ілюстрації розробленої системи

7. Орієнтовний перелік публікацій 1.) Стаття у фаховому виданні; 2.) Патент на корисну модель; 3.) Стаття у матеріалах конференції; 4.) Апробації у вигляді тезисів наукових конференцій – 2 шт. _____

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка

Студент

(підпис)

А.М. Літош
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

С.Л. Лакоза
(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складається з 102 сторінок, в ній міститься 57 рисунки, 28 таблиць, використано 84 джерела.

Актуальність на сьогоднішній день актуальною лишається проблема використання точних систем захоплення руху людини (СЗР), що не залежать від умов проведення експерименту. Використання інерціальних систем захоплення руху дозволяє розширити діапазон використання таких систем. Важливою проблемою є розробка завадостійкого алгоритму оцінки орієнтації та методи підвищення точності.

Магістерська дисертація виконана відповідно до основних напрямків наукових досліджень кафедри.

Мета магістерської дисертації є підвищення завадостійкості та точності інерціальної системи захоплення руху.

Завдання:

1. Огляд систем захоплення руху, опис основних принципів, коротка характеристика.
2. Аналіз алгоритмів орієнтації, що використовують інерціальні датчики.
3. Вибір базового алгоритму орієнтації, опис його мат. моделі.
4. Розробка алгоритму підвищення завадостійкості системи на основі сигналів гіроскопів, акселерометрів, магнітометрів.
5. Калібрування датчиків, експериментальна перевірка розроблених макетів.
6. Розробка власного макету інерціальної системи захоплення руху.

Об'єкт: процес захоплення руху людини та система захоплення руху людини

Предмет: Підвищення точності та завадостійкості алгоритмів оцінки орієнтації об'єктів та системи захоплення руху людини, калібрування та врахування особливостей математичної моделі датчиків інерціального вимірювального блоку.

Методи дослідження: Методи оптимальної обробки сигналів, методи чисельної математики, методи теоретичної механіки, методи теорії оптимального оцінювання, алгоритми фільтрації

Наукова новизна:

1. Вперше запропоновано метод розділення каналів корекції кватерніонного доповняльного фільтру оцінки орієнтації, у алгоритмі якого мінімізовано кількість обчислювальних операцій.

2. Запропоновано використання слідкуючого П-регулятора для обмеження глибини корекції.

Практичне значення: розроблено алгоритмічне забезпечення із підвищеною завадостійкістю для системи захоплення руху, яке також може використовуватися для систем стабілізації та орієнтації; Створено платформу для тестування нового алгоритмічного забезпечення.

Апробація результатів дисертації (виступи на науково технічних конференціях):

1. XX Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос», Дніпро, 2018
2. Міжнародна науково-технічна XI конференція молодих вчених «Електроніка - 2018», Київ, 2018
3. Науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування», Київ, 2018

Публікації:

1. Літош А.М. Розробка інерціальної системи захоплення руху / А.М. Літош, С.Л. Лакоза // Вісник НТУУ «КПІ», серія Приладобудування. – 2018. – вип. 46. – с. 5-13
2. Пат. 120655 Україна, МПК6 G01C 25/00. Спосіб калібрування блока датчиків системи орієнтації / С. А. Шаров (UA), В. В. Кротов (UA), В.В. Цисарж (UA), А.М. Літош (UA), С.Л. Лакоза (UA). - u201705503; заявл. 06.06.2017; опубл. 10.11.2017, бюл. № 21/2017. – 10 с : іл.

Ключові слова: інерціальна система захоплення руху, підвищення точності, розділення каналів, перехресні зв'язки, датчики, компенсація, калібровка, акселерометр, магнітометр, гіроскоп, інерціальний вимірювальний блок.

ABSTRACT

The master's dissertation consists of 94 pages, it contains 57 drawings, 28 tables, 84 sources are used.

The urgency to date is the problem of the use of precise human motion capture system (MoCap), which do not depend on the conditions of the experiment. The use of inertial motion capture systems allows to extend the range of use of such systems. An important problem is the development of a perturbation-tolerant algorithm and methods of improving accuracy for estimating orientation.

The master's thesis is executed in accordance with the main directions of scientific research of the department.

The purpose of the master's thesis is to increase the perturbation immunity and accuracy of the inertial motion capture system.

Task:

1. Overview of the motion capture systems, describe basic principles, describe their characteristics.
2. Analysis of orientation algorithms using inertial sensors.
3. Select the basic orientation algorithm, description of its mat. model.
4. Development of the algorithm for increasing noise immunity of the system based on the signals of gyroscopes, accelerometers, magnetometers.
5. Instrument calibration, experimental check of the developed models.
6. Development of own motion capture system.

Object: the process of capturing the movement of a person and MoCap system.

Subject: Improvement of precision and algorithms perturbation immunity for estimating the orientation of objects and for MoCap system, calibration and taking into account the features of the mathematical model of sensors of an inertial measuring unit.

Methods of research: Methods of optimal signal processing, numerical methods, methods of theoretical mechanics, methods of theory of optimal evaluation, filtration algorithms

Scientific novelty:

1. For the first time, the method of separating channels of correction of a quaternion-to-full-blown filter of orientation evaluation is proposed.
2. The use of a follower of the P-regulator for limiting globin correction is proposed.

Practical significance: algorithmic support with increased noise immunity for the motion capture system, which can also be used for stabilization and orientation systems, is developed; A platform for testing new algorithms is created.

Approbation of the results of the dissertation (presentations at scientific and technical conferences):

1. Patent
2. XX International Youth-based Scientific and Practical Conference "Man and Space", Dnipro, 2018
3. International scientific and technical XI conference of young scientists "Electronics - 2018", Kyiv, 2018
4. Scientific-practical conference of students and post-graduate students "A View to the Future of Instrumentation", Kyiv, 2018

Publications:

1. Litosh AM Development of an inertial trapping system / AM Litosh, SL Lakoza // Bulletin of NTUU "KPI", series of Instrumentation. - 2018 - Issue 46. - p. 5-13
2. Pat. 120655 Ukraine, IPC6 G01C 25/00. Calibration method of the sensor unit of the orientation system / S.A. Sharov (UA), V.V.Krotov (UA), V.V. Tsisarzh (UA), AM Litosh (UA), SL Lakoza (UA). - u201705503; stated. June 6, 2017; has published 10.11.2017, bullet. No. 21/2017. - 10 s: il.

Key words: inertial motion capture system, increase of accuracy, separation of channels, cross-connections, device, compensation, calibration, accelerometer, magnetometer, gyroscope, inertial measuring block.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	4
ABSTRACT	6
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	10
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ	11
1.1 Типи систем захоплення руху. Основні принципи роботи	11
1.1.1 Механічні.....	14
1.1.2 Оптичні.....	15
1.1.3 Магнітні.....	16
1.1.4 Інерціальні.....	17
1.2 Огляд наявних інерціальних систем захоплення руху	19
1.3 Огляд і характеристика існуючих алгоритмів орієнтації для використання в ІСЗРЛ	28
1.3.1 Підходи оцінки орієнтації з використанням Калманівської фільтрації	31
1.3.2 Комплементарні фільтри	34
1.4 Висновки	37
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ТА СИНТЕЗ АЛГОРИТМУ ОЦІНКИ ОРІЄНТАЦІЇ БЕЗПЛАТФОРМНОЇ КУРСОВЕРТИКАЛІ З ПОКРАЩЕНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ..	39
2.1 Базовий алгоритм.....	39
2.1.1 Математичне моделювання алгоритму БКВ	45
2.2 Методи підвищення точності алгоритмів орієнтації.....	48
2.2.1 Методи розділення каналів	48
2.2.2 Обмеження глибини корекції та запобігання фазовому розузгодженню ...	52
2.3 Моделювання покращеного ДФОП	55
2.4 Висновки	58
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТА СТВОРЕННЯ ПРОТОТИПУ ІНЕРЦІАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЗАХОПЛЕННЯ РУХУ ЛЮДИНИ	60
3.1 Біомеханічна модель тіла людини	60
3.2 Апаратна частина.....	63
3.3 Калібровка чутливих елементів ІСЗРЛ.....	68
3.3.1 Калібровка акселерометрів	68
3.3.2 Калібровка гіроскопів	72

3.3.3	Калібровка магнітометрів	75
3.4	Програмна частина	78
3.5	Висновки	80
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ		81
4.1	Опис ідеї проекту	81
4.1.1	Технологічний аудит ідеї проекту	82
4.2	Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	83
4.3	Розроблення ринкової стратегії проекту	88
4.4	Висновки	92
ВИСНОВКИ		93
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		95

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ІСЗРЛ – Інерціальна Система Захоплення Руху Людини

СКВ – Середнє Квадратичне Відхилення

ІВБ – Інерціальний Вимірювальний Блок

ГНС – Глобальна Навігаційна Система

СК – Система Координат

ГСК – Географічна Система Координат

ПК – Персональний Комп'ютер

ФВЧ – Фільтр Високих Частот

ФНЧ – Фільтр Низьких Частот

ФК – Фільтр Калмана

РФК – Розширений Фільтр Калмана

МНК – Матриця Напрямних Косинусів

МПЗ – Магнітне Поле Землі

ДФОП – Доповняльний Фільтр Оцінки положення

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ

1.1 Типи систем захоплення руху. Основні принципи роботи

Останні досягнення науки і техніки дають змогу розробниками впроваджувати передові технології у повсякденне життя людини. Ні для кого не є секретом, що механізми, створені природою, мають найдосконаліші форми, що утворилися в наслідок еволюції та необхідності пристосовуватись до навколишнього середовища. Так, Леонардо да Вінчі, щоб сконструювати крила «ornitottero», вивчав анатомію пташиного крила, враховуючи функції та розташування його пір'я. Зі своїх спостережень він відмітив, що птахи по різному махають крилами, коли зависають в повітрі, летять вперед або приземлюються. Його також цікавили перетинчасті крила кажанів. На основі цих спостережень Леонардо сконструював великі механічні крила, призначені не тільки для підняття людини в повітря, але і для утримування в повітрі, завдяки елеронам та шарнірам. Цей приклад показує важливість дослідження механізмів, створених природою. Як відомо, людське тіло є однією з найдосконаліших механічних систем з розвинуеною мускулатурою та унікальними фізичними властивостями. Тому дослідження людського тіла дають змогу вченим краще зрозуміти в чому полягає секрет його властивостей, та в подальшому використовувати отримані знання для вдосконалення вже існуючих механізмів.

Аналіз руху та постаті людини цікавить вчених із різних областей. Найбільша загадка для вчених – зрозуміти як саме мускульна енергія перетворюється в рух, наприклад біг або стрибок [1]. У 1907 році Едвард Майбрідж (англ. Eadweard Muybridge) випустив книгу, що отримала назву «Людське тіло в русі» (англ. «The human figure in motion») [2]. Ця збірка містить 4789 фотографії, що ілюструють 163 різні типи руху людини. Фото зроблені за допомогою комплексування знімків з декількох високошвидкісних фотоапаратів. На Рис. 1 представлено приклад викладок книги. Можна сказати, що саме Едвард Майбрідж є основоположником систем захоплення руху.

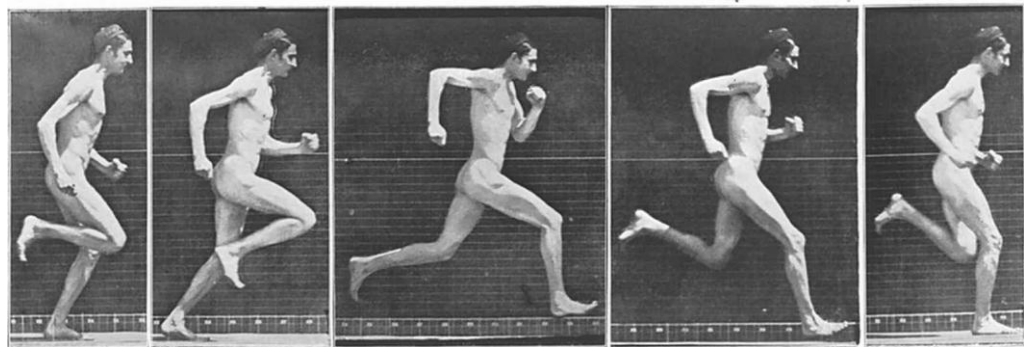


Рис. 1 Серія 9, фази бігу [2]

Використовуючи МоКап системи (від англ. MoCap – motion capture, системи призначеної для технічної реалізації захоплення руху) телекомпанія National Geographic разом із професором біомедичної інженерії університету Уейна (англ. Wayne State University) Детройт, штат Мічиган доктором Синтія Бір (англ. Cynthia Bir), розпочали випуск науково-популярного шоу «Наука спорту». В ході телепередачі розкривались загадки надможливостей спортсменів, розроблялись та перевірялись нові покращені техніки виконання вправ. Використання систем захоплення руху людини для створення анімації або доповнень для систем доповненої реальності (англ. Virtual Reality, VR) є відносно новим напрямом. Використовуючи різні типи систем захоплення руху, можна оцінити не тільки положення тіла в просторі, а й міміку лица чи переміщення мускульної маси під час виконання вправ.

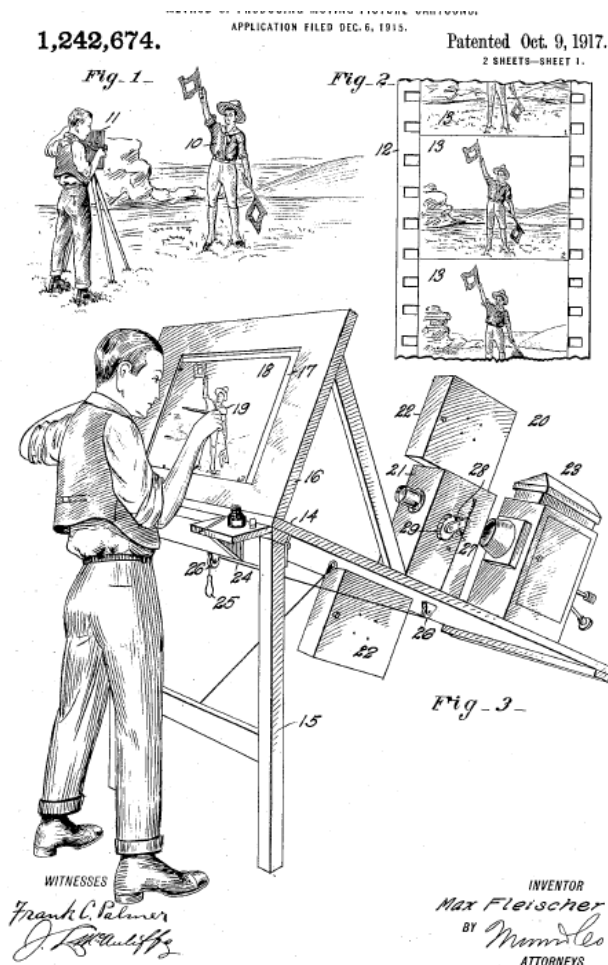


Рис. 2 Процес ротоскопії

році. У 70х роках ХХ сторіччя стало можливим використання комп'ютерної графіки при створенні графіки для фільмів, відеоігор тощо.

У сфері клінічних досліджень та в процесі реабілітації, медики діагностують вади руху пацієнта та використовують отримані знання для подальшої побудови програми реабілітації. Так, наприклад, отримані дані дають змогу хірургу зрозуміти яка саме проблема була виявлена у пацієнта, та побудувати хід оперативного втручання. Порівнюючи результати

руху людини до і після втручання медики роблять висновки про те, наскільки покращились показники та на скільки поточний стан пацієнта відрізняється від ідеального [4]. Саме система захоплення руху дає можливість дослідникам чисельно оцінити на скільки людина відновилася після травм. Лінсі Евет, Енді Бартон та ін. [5] (англ. Lindsay Evett, Andy Burton) запропонували використовувати систему захоплення руху людини в процесі реабілітації після інсульту. Для цього було розроблено спеціальне програмне забезпечення у вигляді тривимірної гри з використанням тривимірної камери Xbox Kinect. Суть гри – повторювати рухи, виведені на екрані. Під час гри програмне забезпечення збирає дані та опрацьовує їх, після чого вони надсилаються лікарю. Спеціаліст оцінює прогрес у реабілітації пацієнта, на скільки рухливість верхніх кінцівок відповідає нормальному стану, та корегує реабілітаційний процес. У спорті, атлети та тренерський склад використовують техніку аналізу рухів у безперервній гонці за покращенням спортивних вмінь спортсменів та зменшенню травматичності. Alison L. Sheets, Geoffrey D. Abrams та ін. [6] проводили дослідження плечового вузла під час різних подач м'яча у великому тенісі використовуючи без маркерну систему захоплення руху. Для дослідження було обрано сім спортсменів, членів Національної асоціації студентського спорту (англ. National Collegiate Athletic Association, скор. NCAA), що грають у першому дивізіоні. Дослід проводився на відкритому тенісному корті, в умовах приближених до реальних. У результаті дослідження виявлено залежність розподілу швидкостей під час подачі м'яча. Виявлено, що під час розгону ракетки, швидкість сегментів кінцівки розподіляється послідовно від плечового суглоба (проксимального положення) до ракетки (дистального положення).

Процес розпізнавання руху людини включає в себе збір даних з датчиків та подальший їх аналіз. Виходячи з умов використання, до систем ставляться різні технічні вимоги щодо точності, смуги пропускання, швидкості відпрацювання, портативності, тощо. Наприклад, для використання в спортивних задачах ставлять високі вимоги до смуги пропускання системи та високої частоти дискретизації даних. Це пояснюється тим, що досліджувані об'єкти рухаються швидко. Наприклад, швидкість руху людини під час спринту на коротку відстань набагато більша від звичайної прогулянки парком. Необхідність досліджень у спеціальних навколишніх умовах, таких як темні приміщення, басейн, гірська місцевість, також вимагають наявності спеціальних технічних засобів. У деяких випадках неможливо використовувати певні типи СЗР. Для застосування СЗР у середовищі доповненої реальності, вимоги ставляться не стільки до частоти дискретизації, скільки до затримки між виконаним рухом та обробленими даними. Такі вимоги пояснюються необхідністю миттєвого відтворення рухів, що дозволяє створити відчуття присутності для користувача.

Технологічний розвиток дає інженерам можливість використовувати нові підходи та методи у визначенні положення сегментів тіла в просторі та відносного кутового положення, використовуючи нові фізичні принципи та вдосконалюючи старі. Загалом, системи захоплення руху можна класифікувати за фізичним принципом на декілька груп: оптичні системи з активними та пасивними маркерами, оптичні безмаркерні (базуються на розпізнанні зображень та образів), інерціальні, магнітні, механічні та акустичні. Людське тіло описується біомеханічною моделлю, котра представляється як рухомі з'єднання твердих тіл. Така модель запропонована у 1988 космічним агентством NASA [7].

1.1.1 Механічні

Першим та найпримітивнішим засобом вимірювання суглобових кутів є гоніометр. Для оцифровування суглобових кутів використовують поворотні інкрементальні, резистивні або тензорезистивні датчики. Датчики кріпляться на тілі на місці суглобів та нерухомо з'єднуються між собою, утворюючи так званий екзоскелет. Кути, виміряні датчиками, використовуються в спеціальних алгоритмах, які оцінюють поточну позу тіла.



Використання гоніометрів на тілі людини є складеною задачею. Механічні системи частіше всього кріпляться до м'яких тканин або м'язів, котрі, в свою чергу, деформуються під час руху. Це призводить до того, що вісь обертання суглобу та гоніометра не співпадає, що призводить до виникнення похибки вимірювання. Навіть за відсутності деформації м'яких тканин, позиціонування датчиків є складною задачею. Особливо гостро стає питання для плечового суглоба, котрий має три вісі обертання. Екзоскелет, одягнений на людину, є важким та сковує рухи, що унеможливує у повній мірі відтворення природних рухів. Через варіювання антропометричних параметрів людей, необхідно проводити складну калібровку та налагодження перед кожним використанням.

Механічні системи мають відносно низьку вартість та високу точність. Тому, на сьогоднішній день, вони використовуються для калібровки інших систем. на даний час, на ринку представлена лише одна механічна система – Animazoo Gypsy Suit [8] (Рис. 3)

Рис. 3 Система захоплення руху Gypsy Suite

1.1.2 Оптичні

Ніша оптичних систем захоплення руху має широкий спектр підходів до вирішення задачі оцінки поз. Загалом, оптичні методи діляться на три під категорії: оптичні з активними маркерами, пасивними маркерами та на основі комп'ютерного зору (pattern recognition).

Оптичні засоби з пасивними маркерами, або відбивачами, базуються на принципі відбивання сигналу. Для цього навколо зони дослідження статично встановлюють високошвидкісні камери із інфрачервоними випромінювачами. Окрім відео зйомки, камери виконують роль збирають дані з об'єкту дослідження. Відстань від камери до маркера, отримують методом тріангуляції, використовуючи відбите від маркера інфрачервоне випромінювання та час між випромінюванням і отриманням сигналу. Для коректної роботи об'єкт дослідження повинен знаходитися у полі видимості камер, тобто периметр досліджуваної зони повинен бути оточеним спеціальними камерами. Ця особливість обмежує область застосування оптичних СЗР. Під час складних рухів, маркери можуть перекриватися або мінятися положення, що призводить до виникнення похибок оцінювання руху. Переваги такої системи – відносно велика точність, відсутність дротів, додаткових батарей та громіздких приладів на тілі, що підвищує природність рухів. На Рис. 4 зображено приклад використання системи VICON [9] для запису рухів спортсменів та подальшого використання при розробці комп'ютерної гри.



Рис. 4 Запис рухів для відеогри "NHL 2K10"

Принцип дії активної оптичної СЗР базується на тому ж принципі, що і СЗР з пасивними маркерами. Головна відмінність – маркери випромінюють модульований інфрачервоний сигнал, використовуючи напівпровідникові світло діоди. Кожен маркер має свій модульований сигнал. Це підвищує точність визначення кутового положення, однак зменшує частоту дискретизації вибірки сигналу. Lorin P. Maletsky, Junyi Sun проводили дослід точності активної маркерної СЗР у порівнянні із механічною. У лабораторних умовах отримана точ-

ність сягнула 0.67° з повторюваністю 95%. Однак відзначається, що розташування камер має вплив на точність; чим ближче об'єкт до фокусної відстані камери – тим точніше результати, виявлено вплив відносного розташування камер на точність [10]. Суттєвий недолік активних і пасивних систем – вплив освітленості навколишнього середовища на точність роботи.

Аналогічно людському зору, існує можливість оцінити руху за допомогою аналізу зображень, використовуючи звичайні камери. Наразі проводиться багато досліджень по розробці алгоритмів, що дозволяють оцінити положення тіла на основі отриманого зображення, використовуючи нейромережі. Але частіше за все, двовимірне зображення не вистачає, необхідно використовувати додаткові камери, котрі дають змогу оцінити положення об'єкта під різними кутами. Цього добиваються використанням широкоформатних камер, що фіксують відстань до об'єкту - LIDAR систем (англ. Light Identification, Detection and Ranging). Представником таких систем є Microsoft Kinect [11] та Asus Xtion Pro [12], Melexis SoftKinetic [13]. Саме без маркерні оптичні системи широко застосовуються для проведення профілактичних заходів для літніх людей або під час реабілітаційних заходів вдома. Переваги – відсутність дротів та додаткових датчиків, простота використання, легка для обробки інформація. Але такі системи мають ряд суттєвих недоліків. До них можна віднести суттєве погіршення якості роботи при недостатньому освітленні приміщення, високий рівень шумів отриманих даних, під час складних рухів, іноді неможливо оцінити коректно орієнтацію тіла через перекриття сегментів, високі вимоги до обчислювальної техніки.

1.1.3 Магнітні

Магнітні СЗР за принципом роботи схожі до оптичних. На тіло кріпляться спеціальні магнітні датчики, що фіксують магнітне поле, котре створюють спеціальні генератори. Генератори, або передавачі, складаються із трьох взаємно перпендикулярних котушок індуктивності, котрі, випромінюють магнітне поле при протіканні струму. Датчики, розміщені на тілі, мають три вісі чутливості, вимірюють напруженість створеного магнітного поля, що пропорційна відстані кожного датчика до випромінювача. Випромінювач та приймач приєднані до обробочого апарату, котрий, за допомогою спеціальних алгоритмів, відтворює рухи людини, спираючись на отримані дані та закладену біомеханічну модель [14]. Системи цього класу відрізняються типом модуляції магнітного струму в передатчиках та способах фіксації. На відміну від оптичних засобів фіксації руху, магнітні системи не залежать від перекриття маркерів, оскільки людське тіло «прозоре» для магнітного поля. Однак, дані СЗР мають ряд недоліків. Похибки магнітних систем безпосередньо пов'язані з фізичними властивостями магнітного поля. Потужність магнітного поля квадратично зменшується по віддаленню від випромінювача. При низькій потужності, на згенероване магнітне поле значною

мірою впливає навколишнє середовище, а саме магнітом'яке та магнітотверде залізо, що знаходиться в області дослідження [15].

1.1.4 Інерціальні

Завдяки розвиненому вестибулярному апарату, людина навчилася ходити на двох кінцівках, тримати рівновагу, фокусувати зір на нерухомих об'єктах під час руху, тощо. Саме внутрішнє вухо фіксує відхилення від положення вертикалі, дію прискорення на тіло та відчуває швидкість обертання. Намагаючись оцінити орієнтацію механічного транспортного засобу, людина винайшла аналог такої системи – інерціальну систему орієнтації. Для роботи такої системи використовуються гіроскопічні датчики кутової швидкості (ДКШ), акселерометри та магнітометри. Ці три блоки утворюють інерціальний вимірюючий блок (ІВБ). Приріст кутового положення знаходиться шляхом інтегрування вимірюної за допомогою ДКШ кутової швидкості. Акселерометр вимірює прискорення, що діє на чутливий елемент, включаючи прискорення вільного падіння, що дозволяє користувачеві оцінити кутове положення тіла відносно напрямку місцевої вертикалі [16] та лінійне переміщення за допомогою інтегрування його показів. Вимірюючи складові вектору магнітного поля Землі, можна отримати орієнтацію тіла відносно напрямку на магнітну північ. Комбінуючи отримані дані, можна оцінити абсолютну орієнтацію тіла у географічній системі координат (ГСК). На Рис. 5 зображено принципову схожість між ступенем вільності суглобу та літальним апаратом.

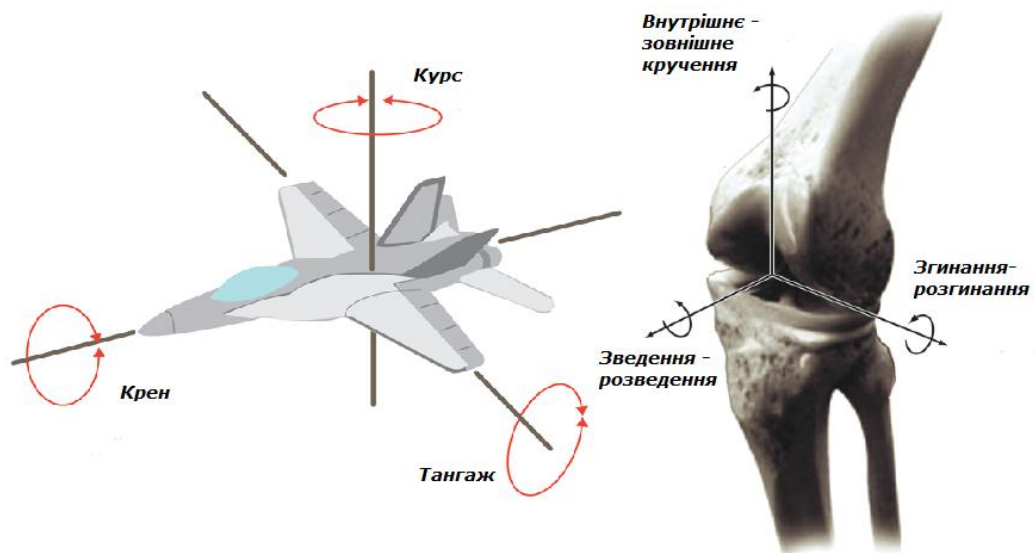


Рис. 5 Орієнтація літального засобу та просторове положення суглобу

Практичне використання інерціальних датчиків у нетрадиційних цілях стало можливе завдяки стрімкому розвитку мікроелектроніки та мікро-електромеханіки, зокрема в сферах виробництва мікромеханічних систем (англ. MicroElectroMechanical Systems, скорочено

MEMS), таких як акселерометри та датчики кутової швидкості (ДКШ). В інерціальних системах обробки параметрів руху людини (ІСОПРЛ) або захоплення руху (ІСЗРЛ) використовуються декілька мініатюрних ІВБ, котрі встановлюються в певних точках на людському тілі. Знаючи положення кожного сегменту біомеханічної моделі, можна оцінити відносне і абсолютне положення сегментів та тіла в цілому.

ІСЗРЛ широко використовуються як у лабораторних дослідженнях, так і на відкритій місцевості. Сигнали з ІВБ для захоплення і виявлення руху можна безперервно записувати під час виконання людиною повсякденної діяльності, лікарні, на відкритому повітрі, у спеціальних середовищах та протягом тривалого періоду часу. Системи збору даних на основі ІВБ є практичними і відносно дешевими. Зібрані дані можуть бути оброблені в автономному режимі або під час руху в режимі реального часу. Ці системи використовують ефективні та швидкі алгоритми обробки даних, що дає змогу людині самостійно кількісно оцінити власний рух. При виконанні вправ та під час реабілітації це дає зворотній зв'язок для оцінки рухової активності людини.

До недоліків інерціальних систем відносяться такі: неможливість використання системи для захоплення міміки; неможливість довгий час точно відслідковувати лінійні переміщення тіла людини в лабораторії. Проте остання проблема може бути вирішена шляхом використання спеціальних алгоритмів підрахунку кроків на основі показів акселерометрів – педометрії [17] або комплексування з глобальними системами радіо або супутникової навігації.

Відсутність зовнішніх джерел інформації; портативність системи; свобода пересування пацієнта (актора); не обмежена площа знімального майданчика; відсутність вимог до навколишнього середовища; висока інформативність отриманих даних, робота в режимі реального часу; відносно невисока вартість – всі ці особливості роблять ІСЗРЛ особливо цікавою для дослідників та розробників.

Вищеописані властивості ІСЗРЛ роблять їх привабливим вибором для розв'язку багатьох задач в медицині [18], спорті [19], кіноіндустрії, доповненій реальності [20]. Варто відмітити, що характеристики точності таких систем можна підвищити декількома шляхами, котрі включають як алгоритмічні аспекти, так і застосування спеціальних рішень щодо чутливих елементів. Рівень і швидкість розвитку мікромеханічних датчиків дає змогу стверджувати, що в недалекому майбутньому будуть доступні недорогі мікромеханічні датчики з характеристиками для вирішення задач тактичного класу. На даний час вже доступні мікромеханічні гіроскопи з нестабільністю нульового сигналу порядку декількох градусів за секунду [19], проте їх ціна занадто висока (~600\$) щоб використовувати в ІСЗРЛ. Окрім технологічного підвищення характеристик чутливих елементів, у роботах пов'язаних з інерціальними

системами, досить давно ведуться дослідження щодо використання надлишкових блоків чутливих елементів для покращення характеристик точності. Сучасний рівень розвитку технологій мікромеханічних чутливих елементів (які розміщуються на одному кристалі кремнію з мікропроцесором, що обробляє первинні сигнали), алгоритмічного забезпечення комплексування датчиків різної фізичної природи, обчислювальних потужностей дають можливості щодо вдосконалення вже розроблених алгоритмів, які використовуються в ІСЗРЛ.

1.2 Огляд наявних інерціальних систем захоплення руху

На ринку представлено декілька комерційних та дослідницьких інерціальних і комплексних СЗР. У загальному випадку, представлені системи поділяються за складністю досліджуваних параметрів руху та об'єкту дослідження. Можуть використовуватись як для оцінки параметрів всього тіла, так і для окремих частин або, навіть, тварин [21]. Загальний алгоритм залишається схожим, але при цьому система відрізняється кількістю ІВБ та, у випадку із тваринами, біомеханічною моделлю. Кількість ІВБ залежить від складності застосовуваної біомеханічної моделі скелету. Найпростіша модель – суглобовий кут, що має лише одну вісь обертання, наприклад колінний. У такому випадку використовується лише 2 ІВБ [22]. Більш складна модель використовується під час аналізу ходьби. В. Жуков під час такого дослідження використовував 5 датчиків, що розміщувалися на нижніх кінцівках [23]. Для оцінки положення всього тіла необхідно використовувати від 15 до 21 датчика [24] [25].



Рис. 6 20-елемента модель тіла людини [25]

Наприклад, для аналізу положень тіла лижника під час швидкісного спуску використовувалось 15 датчиків компанії Xsens [26]. У даному випадку СЗР комплексувалася додатковими GPS приймачами SiRFstar2, для відслідковування положення на карті та двома камерами Sony DCR-TRV 730E. Для дослідження кінематики нижніх кінцівок, Томас Сіл (англ. Thomas Seel) та ін. використовували 6 ІВБ Xsens MTw [27].

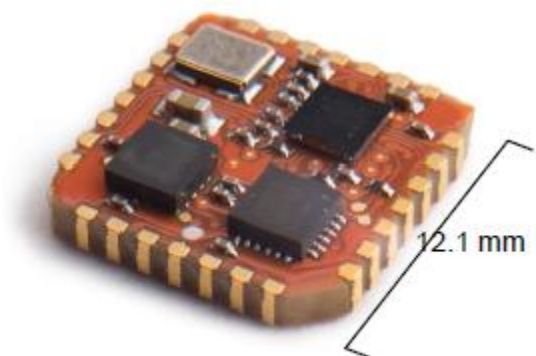


Рис. 7 MTi 1-series

Дуже часто, специфічні задачі вимагають модифікацію систем та можуть комплексуватися додатковими датчиками.

Широко відома у сфері ІСЗРЛ, Нідерландська компанія Xsens пропонує великий спектр продукції від датчиків до програмного забезпечення. Наразі представлено декілька серій дискретних елементів ІВБ: MTi 1-series, 10-series, 100-series, MTi-G-710. Найменша та найдешевша із систем - MTi 1-series, представлена у вигляді

малої друкованої плати із розміщеними на ній чутливими елементами та обчислюючим модулем Рис. 7.

У залежності від комплектації, модуль може видавати різну кількість інформації. У найпростішому випадку – лише інформацію з ІВБ; у найдорожчій комплектації – кути орієнтації. Заявлена динамічна точність визначення горизонту до 1° , курсу - 2° . Дані модулі мають декілька цифрових інтерфейсів для інтеграції з іншими приладами [28]. Флагманом від виробника є система MTi G 710 5-го покоління Рис. 8. Дана система має динамічну точність оцінки горизонту до 0.3° (СКВ), кута курсу 1° СКВ. Відмінна риса, що виділяє цю лінійку систем - наявність високошвидкісної окремої лінії синхронізації блоку ІВБ з периферією, наявність приймача основних глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo та QZSS. Окрім навігаційних параметрів, система видає інформацію про абсолютне кутове положення тіла в ГСК, швидкість, прискорення та зовнішній тиск. Висока стабільність гіроскопів (до $10^\circ/\text{год}$) дає можливість з високою точністю протягом довгого часу оцінювати положення тіла. Частота оновлення даних орієнтації може сягати до 400Гц. Інформація, що може надаватися дискретним ІВБ варіюється в залежності від придбаних опцій. У найпростішому випадку – це відкалібровані покази інерціальних датчиків. У більш дорогих опціях надає кватерніон орієнтації, приріст кутової швидкості, можливість отримати відкалібровані та сирі дані датчиків та часову мітку для синхронізації [29].



Рис. 8 MTi-G-710

Поєднання декількох MTi датчиків в єдину систему утворює ІСЗРЛ MVN Link. Дана система має дротове з'єднання між ІВБ та центральним вузлом, котрий має вбудований ра-

діопередавач та батарею. Радіус роботи передавача – 150 м на відкритій місцевості та 50 м у будівлі, дистанція роботи може збільшуватися шляхом модифікації передавача. Частота оновлення даних параметрів руху людини до 240Гц, при цьому затримка не більше 20мс. Час роботи від однієї батареї становить до 9.5 годин безперервної роботи.



Рис. 9 MTw Awinda

Окрему нішу займає ІСЗРЛ Xsens MVN Awinda, 2 покоління, до складу якої входить до 20 бездротових датчиків MTw Рис. 9. Бездротовий протокол обміну даних між ІББ та приймачем використовує власний протокол обміну Awinda на частоті 2.4 ГГц, котрий базується на стандарті IEEE 802.15.4 PHY [30]. Динамічна точність роботи алгоритму оцінки орієнтації блоку сягає 2° (СКВ), статична – 0.1° для визначення положення горизонту та 1° визначення курсу при умові відсутності

зовнішніх збурень. Частота оновлення даних, доступна користувачеві – 60Гц при одночасному використанні 20 ІББ MTw і 120 Гц лише з одного датчика. Наявна функція буферизації даних кожного ІББ до 30с. Затримка сигналу ІСЗР може сягати до 30 мс, радіус роботи на відкритій місцевості до 50 м та 20 м в середині приміщень. Час автономної роботи одного ІББ – до 6 годин безперервної роботи. Синхронізація даних можлива лише через приймач, котрий має 4 порти: 2 для входу сигналу синхронізації, 2 для виходу. Передача даних з приймача на персональний комп'ютер (ПК) здійснюється через інтерфейс USB [31].

Разом з приладами, компанія Xsens пропонує користувачам низку програмних рішень для подальшого використання їх продукції та інтеграції з уже наявними системи, наявні бібліотеки для розробки власного програмного забезпечення на мовах програмування C та C++, середовищі Matlab, готові DLL для 32 та 64 бітних систем. Окрім того, виробник пропонує власне середовище розробки та оброки даних MVN Analyze, MVN Animate котрі відрізняються за цільовим призначенням. Наявна можливість використання програмних рішень від сторонніх розробників, таких, як Dassault Systems, Unity3D, Siemens PLM [32]. Ці програмні засоби можуть експортувати та імпортувати інформацію в різні цільові формати .bvh, .fbx, .c3d, ASCII тощо.

ІСЗРЛ від компанії Xsens є найбільш легко інтегрованими для сторонніх приладів. Наприклад, для навігації людини в будівлі неможливо використовувати супутникової навігації через відсутність сильного та стабільного сигналу. Тому ІСЗРЛ можливо комплексувати додатковою локальною системою навігації по радіосигналу [33]. Поряд з навігаційним даними,

є можливість зчитувати активність м'язів під час руху, використовуючи системи електро міографії і таких проектів як Noraxon EMG, Cometa Wave, Delsys Trigno EMG, BTS FREEEMG, оптичними Vicon чи Kinect [34].

Головним конкурентом Xsens є компанія Inertial Labs та C3P 3DSuit [35]. Компонівка системи дуже схожа до MVN Line. Як і у попередньому випадку, IC3PJ 3DSuit складається із декількох ІВБ (4-17 шт., в залежності від обраної конфігурації), однак є можливість розширення до 30 приладів. Система представляє собою мережу ІВБ, з головним модулем ІВБ з'єднані дротовою шиною даних та кабелем живлення. Головний пристрій має бездротовий WIFI передавач та батарею, що підвищує рухомість системи. Він розміщується на поясі об'єкту дослідження, Рис. 10. ІВБ, що використовуються в системі мають схожі динамічні характеристики як і у MTi 10 серії: 2° (СКВ) у визначенні кута курсу та 1° (СКВ) у визначенні площини горизонту.



Рис. 10 Inertial Labs 3DSuit

Слід зазначити, що стабільність дрейфу гіроскопів сягає $60 \text{ }^\circ/\text{год}$. Частота оновлення даних параметрів руху людини – до 60Гц із затримкою відпрацювання до 20мс. Кожен ІВБ має вбудований блок цифрової обробки сигналів та надає розробнику інформацію про кватерніон орієнтації та калібровані покази датчиків.

Для обробки даних на ПК, розробник пропонує власне середовище розробки SDK та додаткові плагіни для MotionBuilder від Autodesk, Unity3D, створені бібліотеки для середовища Matlab. Записані дані можуть експортуватися в .bvh файл та (або) відтворюватися в режимі реального часу [36], [37], [38].

3DSuit не має лінії синхронізації даних. Ця особливість ускладнює інтеграцію системи із сторонніми приладами та системами. Використання WIFI для передачі даних може бути не

надійним та у випадку перенасичення каналів сигнал може погіршуватися. Налагодження обміну даних між ПК та роутером є не очевидним, його потрібно налагоджувати при кожному новому підключенні. Вага системи набагато більша від MWN Line, в той час як точність гірша. Великогабаритний передавач, що знаходиться на тілі та дротове з'єднання заважають, відтворювати рухи. Унеможлиблюється швидка заміна ІВБ у разі його виходу зі строю через особливість конструкції. Усі ці особливості роблять ІСЗРЛ 3DSuit не привабливою для розробників, про що свідчить мала кількість згадувань у дослідженнях.



Рис. 11 APDM Opal

Відносно новою розробкою в сфері ІСЗРЛ є система Opal від IPDM. Вона складається із 24 малогабаритних бездротових ІВБ, що розміщуються на тілі людини. Система не виділяється високою динамічною точністю роботи - похибка до 3° СКВ у визначені орієнтації. Однак автори проекту ставлять акцент на зручності використання та частоті видачі результату, адже інколи замовники не вимагають доволі високої точності. Кожен ІВБ представляє собою

збірку із акселерометра, гіроскопа, магнітометра обчислюючого чого пристрою та бездротового передавача. Характерною особливістю є наявність LED дисплею Рис. 11.

Дана система не має головного пристрою. ІВБ між собою утворюють бездротову мережу та автоматично синхронізуються. Максимальна розсинхронізація менше 1 мс. Записані дані можуть зберігатися як у внутрішній пам'яті (об'єм запису до 72 годин) так і одразу передаватися на приймач та подальшу обробку на ПК. Швидкість передачі сягає до 2 Мбіт/с, час безперервної роботи до 8 годин. Наявність у приймачеві цифрових виходів для синхронізації зі сторонніми приладами відкривають широкі можливості для використання, як і у випадку з MVN Awinda. Ще одна особливість – відсутня необхідність прив'язки ІВБ до певного місця на тілі. Тобто датчики можна розміщувати на тілі у випадковому порядку і на дисплеї обирати в якій саме точці ІВБ знаходиться. Гнучкість у використанні, відносна відкритість коду та легкість інтеграції з іншими системами робить її цікавою для дослідників, про що свідчать численні публікації досліджень рухів з використанням цієї ІСЗРЛ [39] [40], навіть хвороби Паркінсона [41]. Проводяться порівняльні дослідження систем, щоб чисельно оцінити точність роботи в реальних умовах використання. Результати трохи відрізняються від заявлених виробником [42] [43]. Порівняння, вище розглянутих систем представлені в Табл. 1.1

Perception neuron [44] до своєї ІСЗРЛ додала можливість оцінки положення пальців рук. Цей пристрій виконаний у вигляді рукавиці і також використовує ІВБ для оцінки положення сегментів пальців (Рис. 12).



Рис. 12 Прилад для захоплення положення пальців

Конструкція ІСЗРЛ Perception neuron схожа до 3DSuit: дискретні елементи ІВБ з'єднані проводами до головного блоку, котрий по бездротовій мережі WIFI передає дані на ПК. Загальна кількість нейронів-ІВБ - до 32. Точність оцінки орієнтації майже не відрізняється від ІСЗРЛ OPAL ($\sim 2^\circ$ СКВ).

Поряд із промисловими зразками, науковці створюють власні зразки ІСЗРЛ. Питання розробки постає у випадках натурних випробувань нових алгоритмів орієнтації або імплементації доопрацювань відомих.

Табл. 1.1 Порівняння характеристик найпопулярніших ІСЗРЛ

	Xsens MTw	Inerial Labs OSv3	APDM Opal
Кількість ІВБ (характеристики)	2-32 шт. (± 2000 град/с; $\pm 16g$; $\pm 1.9Gc$)	4-17 шт. ($\pm 1200/\pm 2000$ град/с; $\pm 2g/\pm 16g$; $\pm 2Gc$)	2-24 шт. (± 2000 град/с; $\pm 2g/\pm 6g$; $\pm 6Gc$)
Точність ІВБ в ста- тиці	Курс: 1° Крен, тангаж: 0.5°	Курс: 1° Крен, тангаж: 0.2°	Курс: 1.5° Крен, тангаж: 1.15°

Точність ІВБ в динаміці (СКВ)	Курс – 1.5° Крен, тангаж – 0.75°	Курс - <2° Крен, тангаж – 1°	2.8°
Наявність бездротового зв'язку	Так, ISM 2.4 GHz	Так, WIFI 802.11a/b/g/n або Bluetooth	Так, 2.4 GHz
Радіус роботи в приміщенні/відкрита місцевість (м)	10/20	50	10/30
Частота опитування датчиків (Гц)	1800	1000	1280
Частота видачі сигналу (Гц)	20-120	60	20-128
Затримка (мс)	10	20	30
Вихідні дані	<ul style="list-style-type: none"> • Кути орієнтації • Сигнали з ІВБ 	<ul style="list-style-type: none"> • Кути орієнтації • Сигнали з ІВБ 	<ul style="list-style-type: none"> • Кути орієнтації • Сигнали з ІВБ
Формати вихідних даних	<ul style="list-style-type: none"> • ASCII (XML) • C3D • BVH, FBX • Movie (AVI, M4V) 	<ul style="list-style-type: none"> • BVH files 	<ul style="list-style-type: none"> • BVH files • C3D • HDF5 • CSV
Середовища розробки	<ul style="list-style-type: none"> • MT SDK • MATLAB • C/C++ 	<ul style="list-style-type: none"> • SDK • MATLAB 	<ul style="list-style-type: none"> • OPAL SDK • MATLAB • Java, C, C++ • Blender



Рис. 13 Розміщення сенсорів на костюмі

Програмне забезпечення готових систем, особливо алгоритм орієнтації, частіше за все є засекреченим та не доступним у вільному доступі. Користувач має можливість користуватися лише тим функціоналом, що закрив виробник. Так, наприклад, в модулі MTi користувач має доступ лише до кватерніону орієнтації (у випадку якщо це передбачено комплектацією) та

сирих даних із інерціальних датчиків. Виробником не закладена можливість записувати власний код мікропрограми. Звісно, можна розібрати ІВБ та перепрограмувати контролер, однак відсутня інформація щодо апаратного забезпечення, втрачається гарантія від виробника. Щоб імплементувати власний алгоритм орієнтації, необхідно використовувати додатковий контролер або робити пост-обробку на ПК. У випадку специфічних задач, користувач не мо-

же додати виконання рутини до блоку ІВБ, відсутня можливість правильного налаштування переривання роботи мікропрограми.

Сарвенас Салехі та ін. [45] представили процес розробки та використання дешевої системи захоплення руху верхніх кінцівок людини, використовуючи мініатюрні мікромеханічні ІВБ. В якості чутливих елементів використовувалась інерціальна збірка на кристалі MPU9150, в якій на одному кристалі розміщені тривісний гіроскоп, акселерометр та магнітометр. Датчики розміщуються на костюмі та є легкими, тому не сковують людину під час руху (Рис. 13).

Для збору даних використовується мікрокомп'ютер GnuBlin. Розроблена спеціальна мережа з'єднань ІВБ та мікро комп'ютера, що зменшує споживаючу потужність та складність провідного з'єднання. В якості алгоритму орієнтації використовується розширений фільтр Калмана [46]. Зв'язок мікрокомп'ютера та ПК здійснюється шляхом передачі по бездротовій мережі WIFI, що, як відмічають автори, не є ефективним способом з точки зору збереження енергії. Нажаль, відсутні чисельні дані щодо точності визначенні орієнтації, оскільки метою проведення роботи була розробка енергоефективної системи збору кінематичних параметрів руху.

Проблема навігації ІСЗРЛ вирішується різними методами, що згадувалося раніше. Ерік Фокслін (Eric Foxlin), співробітник компанії InterSense, розробив алгоритм обрахунку кількості кроків на основі показів акселерометра та гіроскопу. Беручи до уваги, можливість чітко визначати позицію початкової точки та кількість зроблених кроків, можливо визначити положення тіла в просторі. Беручи до уваги цю особливість, науковці із кафедри Механіки та автоматизації Гонконгського університету, розробили ІСЗРЛ з можливістю позиціонування Pedalvatar [47]. В алгоритмі визначення орієнтації як кінематичний параметр використовувалась матриця напрямних косинусів. Отримана динамічна точність порядку 4° (СКВ) у визначенні курсу та 2° у визначенні положення горизонту.

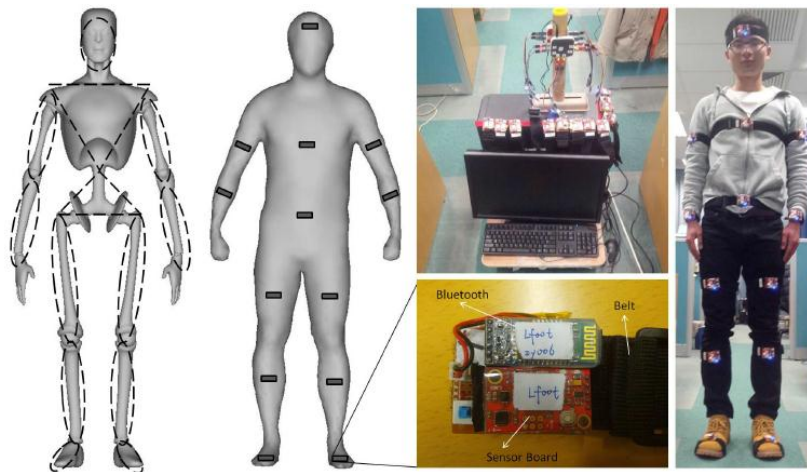


Рис. 14 ІСЗРЛ Pedalvatar

ІВБ мають бездротовий модуль Bluetooth, тому дані передаються безпосередньо на ПК. Однак, виникає питання щодо завадостійкості алгоритму орієнтації до впливу магнітних збурень на точність роботи.

Велика кількість досліджень підштовхує розробників до створення власних методів оцінки орієнтації тіла в просторі [47], [45], [48], [49], [50]. Зважаючи, що елементна база, доступна зараз, майже однакова, то стабільність і точність роботи ІВБ і, як наслідок всієї системи, залежить від алгоритму, що використовується для оцінки параметрів орієнтації. Підвищення завадостійкості, частоти видачі сигналу, стабільності роботи цікавлять розробників даних систем. Саме розробці алгоритму з підвищеною завадостійкістю та практичній перевірці присвячена дана дисертаційна робота.

1.3 Огляд і характеристика існуючих алгоритмів орієнтації для використання в ІСЗРЛ

Інерціальні системи, на основі показів котрих проводиться оцінка положення сегментів тіла, використовуються інформація про абсолютну орієнтацію тіла відносно Землі. Під терміном «абсолютна орієнтація» мається на увазі географічна система координат (ГСК). Для нульового положення, така СК використовує напрям місцевої вертикалі (положення горизонту) та напрям на магнітну північ. Параметрами, що описують поточне положення тіла та перетворення координат можуть бути матриці напрямних косинусів або кватерніон. Переваги кутів Ейлера-Крилова - вони наглядно показують розробнику послідовність поворотів тіла в просторі. Однак, при переході від одного положення до іншого присутні нелінійні перетворення. Використання нелінійних перетворень є нераціональним, оскільки потребує більших ресурсних затрат [51]. Найбільш оптимальним є використання кватерніонів, де всі перетворення зводяться до операцій множення та додавання. Це підвищує швидкість роботи та дає можливість використання контролерів та процесорів з RISC архітектурою, наприклад MIPS, тактова частота роботи котрого може бути більше 150 МГц. Окрім того, при роботі з кватерніонами, відсутні ефект складання рамок. Поєднання ІВБ та алгоритм оцінки орієнтації утворює систему оцінки кутового положення тіла в ГСК – курсовертикаль (англ. Attitude and heading reference system, AHRS).

Пошук оптимальної оцінки орієнтації між двома координатними системами із декількох векторів спостереження вперше було зроблено вченим Г. Вахба [52] (англ. G. Wahba) під час розробки супутникової системи навігації для місії під назвою Atmospheric Explorer Missions (AEM), та Magsat. Задача полягала в мінімізації квадрату похибки функції втрат під час визначення матриці орієнтації, використовуючи щонайменше два відомих одиничних вектори, в нашому випадку магнітометричний та акселерометричний. В процесі вирішення поставленої задачі було розроблено два алгоритми: неоптимальний (детерміністичний) алгоритм TRIAD та оптимальний QUEST (англ. QUaternion ESTimator) [53]. Перший метод не бере до уваги частину вимірювань датчиків запобігаючи перевизначенню системи. Незважаючи на те, що алгоритм TRIAD має відносно прості матричні перетворення, для оцінки матриці коваріацій орієнтації необхідно чисельно чукати частинні похідні, що, в свою чергу, потребує більшу кількість тактів на виконання алгоритму. Більш того, відсутня можливість брати до уваги більше двох векторів спостереження [53]. На противагу неоптимальному методу, QUEST використовує принцип мінімізації квадрату функції втрат (1), що значно спрощує

$$L(A) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n a_i |W_i - AV_i|^2 \quad (1)$$

рішення проблеми Вахби, оскільки використання функції втрат призводить до рівняння знаходження власних значень кватерніона. Необхідність у знаходженні матриці коваріацій відповідає.

Використовуючи алгоритм в ГСК, опорним вектором для цих алгоритмів, як згадувалось раніше, є положення місцевої вертикалі та напрям на магнітну північ, виміряні за допомогою збірки тривісних акселерометрів та магнітометрів відповідно. Алгоритмічна точність алгоритму QUEST зображено на Рис. 15.

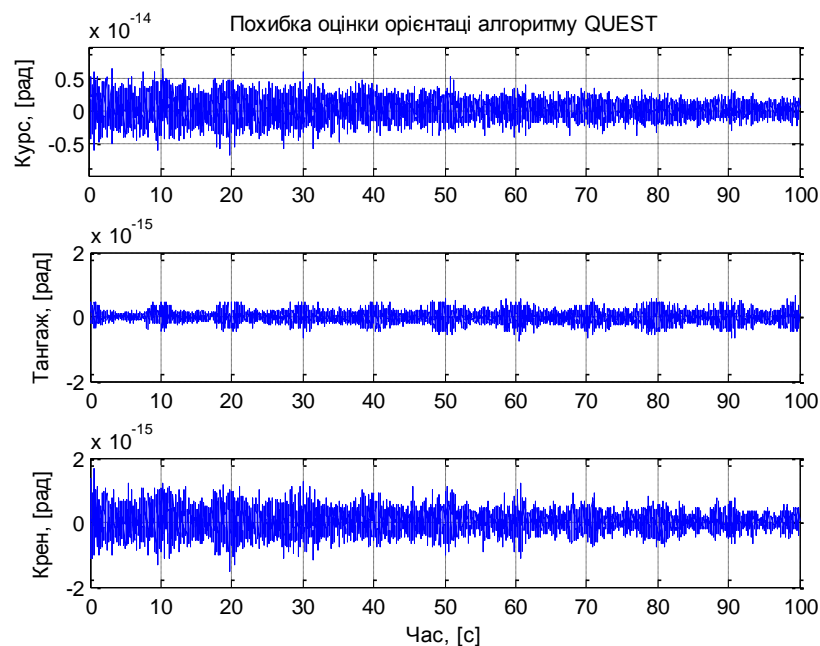


Рис. 15 Точність роботи QUEST

Алгоритм QUEST працює доволі гарно в умовах сталого навколишнього середовища, а саме при відсутності зовнішніх збурень. В момент дії зовнішніх завад, прискорення або різкої зміни кутового положення спостерігаються викиди, що призводить до різкого зростання похибки [54]

Схильність позиційних датчиків до зовнішніх збурень унеможливорює використання алгоритмів оптимальної оцінки орієнтації, використовуючи лише сигнали акселерометра та магнітометра. Дія прискорення на тіло є не постійною, тому викликана похибка має тимчасовий характер та високочастотну складову.

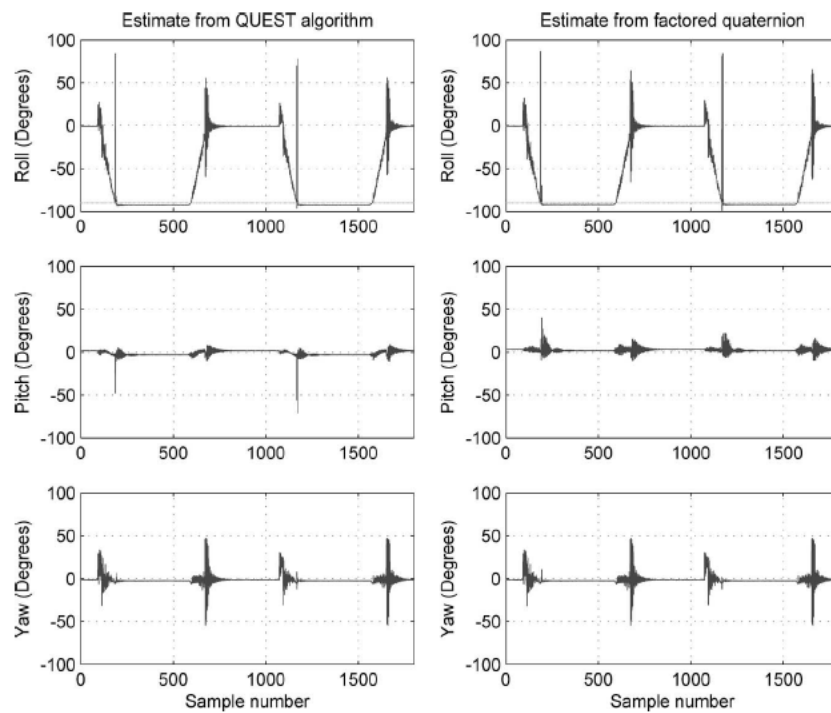


Рис. 16 Робота QUEST під час різкої змін положення [54]

Для компенсації дії похибок, викликаних результатом дії прискорення використовуються гіроскопи. Інтегруючи кутову швидкість можна оцінити приріст кутового положення (2).

$$\int \dot{\alpha}(t)dt = \alpha(t) + C \quad (2)$$

Кутове положення у поточний момент часу знаходиться як сума приросту поточної точки та попередньої (3)

$$\alpha_{nom.} = \int \dot{\alpha}(t)_{nom.} dt + \alpha_{nom.} + C_{nom.} \quad (3)$$

В результаті, з часом наколюється постійна інтегрування C , що через певний проміжок часу робить покази гіроскопа недостовірними. Окрім похибки інтегрування, через неточність технологічного процесу виготовлення гіроскопів існує ефект, що має назву дрейф гіроскопу. Виявляється як девіація вихідного нульового сигналу датчика з часом, що має випадковий характер. Гіроскоп, за природою, не схильний до високочастотних збурень та виступає в ролі фільтру низьких частот [55]. Поєднання датчиків із різним характером дає можливість компенсації недоліків кожного: дрейфу гіроскопа та різких викидів позиційних датчиків.

Алгоритми компенсації дрейфу гіроскопів прийнято називати фільтром, оскільки алгоритм компенсування дрейфу нуля є фільтром високих частот (ФВЧ), а для позиційних датчиків фільтром низьких частот (ФНЧ). Загалом, всі типи фільтрації можна розділити на два

великі класи: комплементарні фільтри та побудовані на принципі Калманівської фільтрації. Комплементарні, або доповняльні, шукають оптимальний поправочний коефіцієнт для зменшення похибки та можуть бути представлені у виді адитивної або мультиплікативної складової. Маючи інформацію про рівень, природу шуму та характер руху моделі, Калманівська фільтрація оптимально компенсує похибки. Параметрами орієнтації, що використовуються в таких алгоритмах можуть бути як кути Ейлера-Крилова або матриці напрямних косинусів, так і параметри орієнтації в кватерніонах. Огляд нелінійних алгоритмів фільтрації представлено в [56]

1.3.1 Підходи оцінки орієнтації з використанням Калманівської фільтрації

Існує велика кількість варіацій використання розширеного фільтру Калмана (РФК). Стандартно, ФК використовує вектор вимірювання, котрий має 9 елементів: три елементи вектора вимірювання датчика кутової швидкості, трьох елементів вимірювання прискорення та трьох елементів показів магнітометра. Тобто вектор вимірювання складається з показів всіх датчиків ІВБ в поточний момент часу. Перші три елементи (складові кутових швидкостей) є лінійними щодо вектору стану. Однак, інші шість елементів мають нелінійне співвідношення у визначенні кутового положення. Використання нелінійних перетворень є неефективним та ресурсоємним, тому ФК у стандартній формі майже не використовується. РФК дає можливість уникнути проблеми лінеаризації [57].

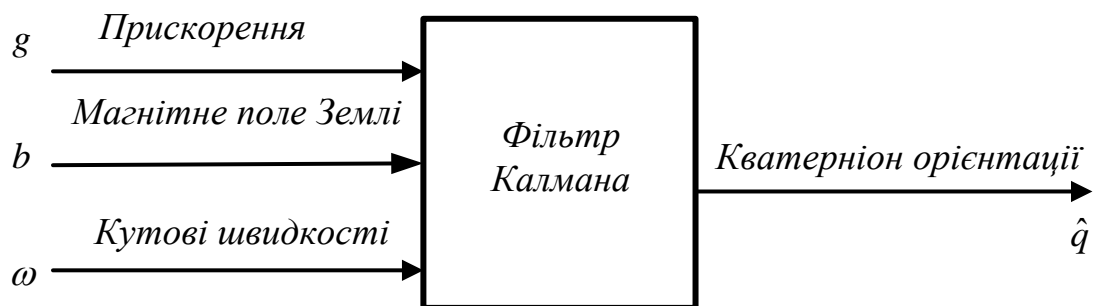


Рис. 17 Структура використання фільтра Калмана

Принцип, який закладено у РФК полягає у використанні в якості вектора вимірювання рівняння, що є лінійним по відношенню до вектору стану. Хсяопін Йун (англ. Xiaoping Yun) та Еріком Бахманом (англ. Eric R. Bachmann) [58] запропонували використовувати окремий додатковий алгоритм для знаходження кватерніону орієнтації по позиційним датчикам. Запропонована модель зміни кінематичних параметрів орієнтації є семивимірним вектором вимірювання x , де перші три складові визначаються вектором вимірювання складових кутового обертання, виміряних за допомогою гіроскопу, інші чотири – складові кватерніону орієнтації q

$$x = \begin{bmatrix} \omega \\ q \end{bmatrix}. \quad (4)$$

В якості допоміжного алгоритму оцінки орієнтації автори використали вище згаданий QUEST. Для кожної ітерації РФК необхідно виконати оцінку так званого позиційного кватерніону q_m

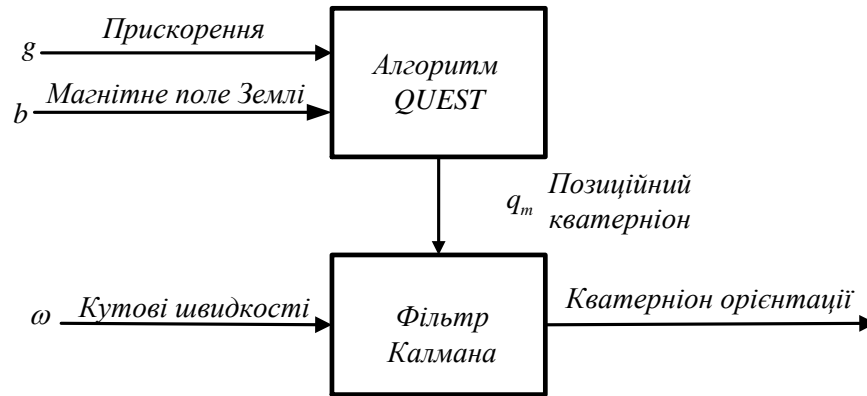


Рис. 18 Розширений фільтр Калмана [58]

В результаті лінійне співвідношення між вектором стану та вектором вимірювання дає змогу використовувати спрощені рівняння ФК. Анджело Сабатіні (Angelo Sabatini) у своїй роботі [59] використовував розширений фільтр Калмана із 9 складовими вектора вимірювання. Характерною особливістю запропонованого підходу є аналіз руху людини, а саме прискорення що діє на тіло та здійснювалися заходи щодо фіксації магнітних девіацій. На основі цих показів та використання адаптивної матриці коваріацій шуму датчиків для зменшувався вплив збурення точність роботи. Алессандро Філіппескі та ін. (англ. Alessandro Filippeschi) [60] проводив дослідження характеристик роботи різних фільтрів для випадку захвату руху верхніх кінцівок людини, де розглянуто п'ять алгоритмів фільтрації: 1 лінійний фільтр Калмана авторів Rong Zhu та Zhaoying Zhou [61]; 2 розширений кватерніонний фільтр Калмана [58]; 3 комплементарний фільтр A. D. Young [62]; 4 комплексний відео-інерціалльний алгоритм захоплення руху Gabriele Bleser [63]; 5 покращений відео-інерціалльний алгоритм захоплення руху L. Peppoloni [64].

В першому алгоритмі автори використали звичайний фільтр Калмана для моделювання розрахункових показів акселерометра та магнітометра. Далі, отримані дані використовуючи матриці напрямних косинусів поєднувалися з реальними показами датчиків. Після поєднання оцінювалась орієнтація по скоректованим показам.

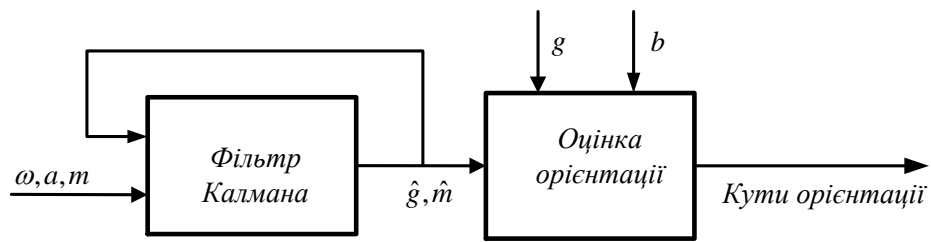


Рис. 19 Блок-діаграма першого методу, де ω - кутові швидкості, a, m - апіорні значення положення вертикалі та вектору напруженості МПЗ

В третьому підході автори запропонували враховувати лінійне прискорення руху кінцівки для підвищення точності оцінки положення, базуючись на кінематичних знаннях про рух об'єкту. Четвертий та п'ятий підходи використовують відеокамеру, розміщену на тілі (у першому випадку) та поряд (у п'ятому методі) для проведення коригування під час магнітних завад.

В результаті проведення дослідів [60] автори відзначили високу точність алгоритмів 1 та 4. Однак, різниця між іншими була не велика.

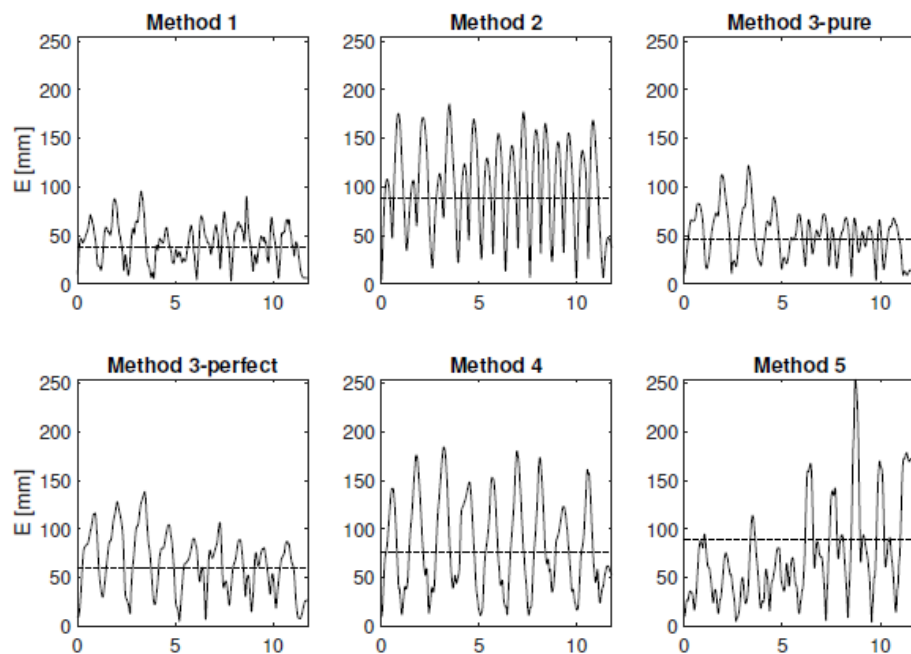


Рис. 20 Порівняльна характеристика точності відтворення руху [60]

Підсумувавши всі переваги та недоліки алгоритмів, автори радять використовувати 1й підхід. Однак, у нього є одна особливість – він має певну часову затримку між рухом та отриманим результатом. Про цю проблему описано в [61]. Тому необхідно брати до уваги цю особливість. Також зазначалось про важкість в реалізації цього підходу на реальному пристрої.

За потреби, фільтр Калмана можливо розширити додатковими датчиками, таким як GPS або ГЛОНАС та комплексувати з інерціальною навігаційною системою ІНС [65]. Через свою відносно велику точність та можливість оптимально оцінювати кутові положення ФК

знайшов широке застосування в комерційних зразках. Так, наприклад, компанія Xsens для своїх приладів використовує власний РФК – ХКФ (Xsens Kalman Filter)

З практичної точки зору, використання фільтру Калмана не завжди є оптимальним. Виконання лінеаризації та знаходження матриці Якобі (матриця частинних похідних), у випадку наявності нелінійних перетворень у векторі стану та вимірювання, потребує доволі великої обчислювальної потужності, як і робота з матрицями, особливо при знаходженні інверсії матриці [66], [67]. Значно підвищується складність реалізації алгоритму на контролера та процесорах без апаратного блоку роботи з плаваючою точкою. Точність та коректність фільтрації залежать від закладеної моделі процесу. У випадку неточної початкової оцінки стану, фільтр може втрачати стійкість. Неодооцінка закладеної матриці коваріацій шуму датчиків може призвести до поганої узгодженості матриць, що, в свою чергу, підвищує ризик апаратного збою системи [68].

1.3.2 Комплементарні фільтри

Альтернативою використанню засобів Калманівської фільтрації. Суть методу – побудова полоскового фільтру, котрий буде слугувати ФНЧ для позиційних датчиків та ФВЧ для гіроскопа. Таким чином досягається вирішення задачі: в області низьких частот переважають покази акселерометрів та магнітометрів (а це означає, що дрейф нуля відсутній), на високих – гіроскопу (відсутні вплив вібрацій, шуму) [55].

Вираз для обрахування кутів орієнтації за допомогою комплементарного фільтру має вигляд:

$$\hat{\phi}(n) = K(\hat{\phi}(n-1) + \omega_g \Delta t) + (1-K)\phi_a + (1-K)\phi_m. \quad (5)$$

Де $\hat{\phi}(n)$ - оцінка кута орієнтації в поточний момент часу; $\hat{\phi}(n-1)$ - оцінка кута орієнтації в попередній момент часу; ω_g - кутова швидкість, отримана по показам ДКШ; ϕ_a - кут нахилу, отриманий по показам акселерометра; ϕ_m - кут курсу, отриманий по показам магнітометра; Δt - час інтегрування; K - коефіцієнт фільтру.

У найпростішому випадку, для виконання поставлених властивостей фільтру необхідно правильно обрати значення параметру K - коефіцієнту, визначаючого вклад показів датчиків.

А. Ю. Івойлов [55] під час розробки системи автоматичної стабілізації двоколісного робота запропонував використання класичного ФНЧ для акселерометра та ФВЧ для гіроскопа (Рис. 21). Однак було зазначено, що такий підхід не завжди відповідає динамічним вимогам і може вносити суттєві спотворення в динаміку роботи системи. Тому даний підхід майже не використовується на практиці.

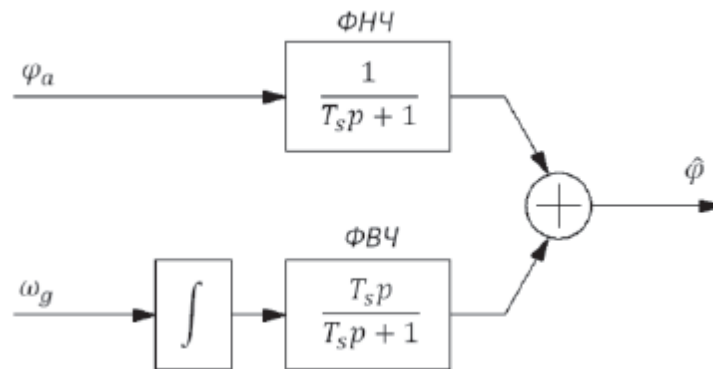


Рис. 21 Структурна схема комплементарного фільтру

Для підвищення стійкості системи, використовують методи мінімізації похибки між показами акселерометра та гіроскопа. Махоні та ін.. [69] запропонували три методи вирішення задачі інерціальної навігації: комплементарний фільтр, Найбільш популярним комплементарним пасивний комплементарний фільтр та явний комплементарний фільтр (англ. explicit complementary filter). Явний комплементарний фільтр не потребує алгебраїчного відтворення орієнтації. Тобто даний підхід є нечутливим до неточності визначення кутового положення. Дрейф гіроскопа компенсується шляхом внесення інтегральної ланки по швидкості зміни орієнтації. Корекція оцінених кутів базується на аналізі стабільності по Ляпунову та знаходженні матриці похибок. За словами автора, цей підхід є ідеальним для використання в малогабаритній техніці. Наразі популярним алгоритмом оцінки орієнтації є підхід, запропонований Себастьяном Меджвіком [50]. Суть методу полягає у компенсації дрейфу гіроскопа шляхом коригування сигналів ДКШ по показам акселерометрів та магнітометрів. Для цього шукається різниця оціненого кватерніону орієнтації з попереднього кроку та позиційного кватерніону з поточного, тобто фактично знаходиться приріст положення поточної точки по відношенню до попередньої. Використовуючи метод градієнтного спуску розв'язується нелінійне рівняння зміни кутового положення та знаходиться поправочний вектор. Зваживши вектор на коефіцієнт глибини корекції β , вводиться адитивний сигнал в канал визначення кватерніона орієнтації, Рис. 22.

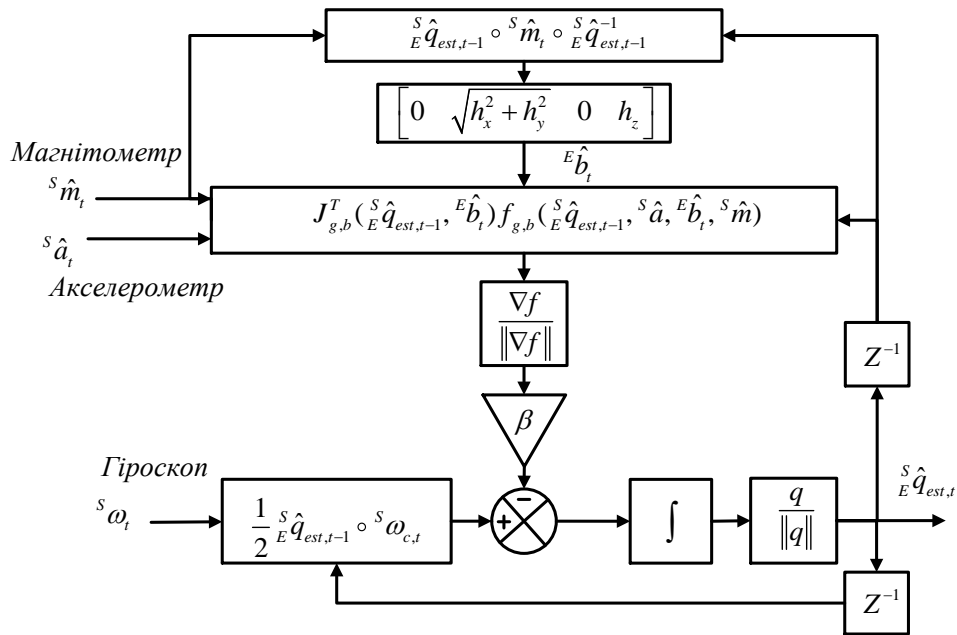


Рис. 22 Структурна схема комплементарного фільтру Меджвіка [50]

Роберто Валенті (англ. Roberto G. Valenti) [70] та 36н.. запропонували метод послідовних поворотів для корекції показів.

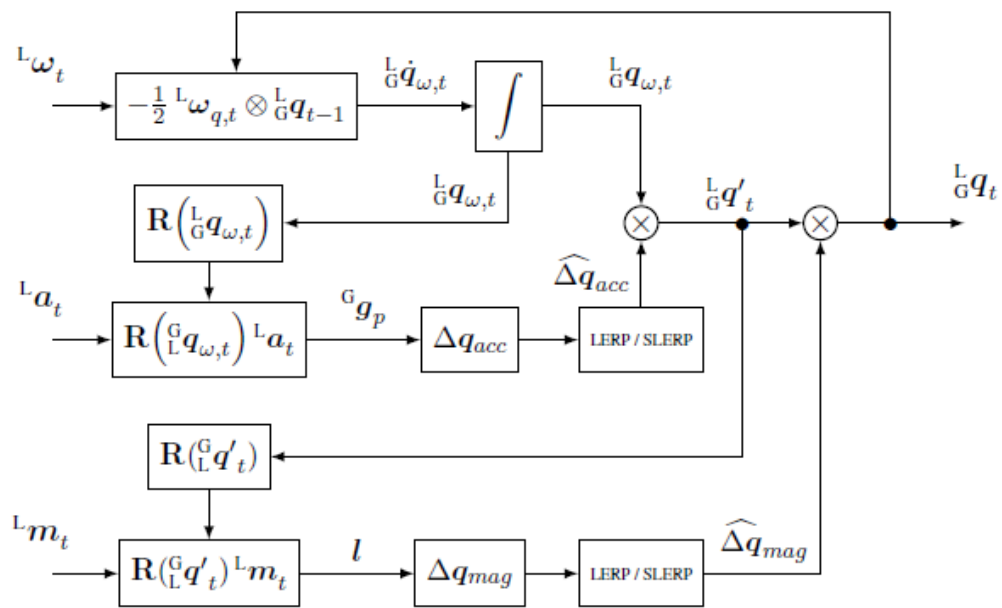


Рис. 23 Блок діаграма комплементарного фільтру [70]

Фази роботи алгоритму схожі до ФК. Першою йде фаза передбачення. По оціненим значенням кватерніона, розраховується МНК. Виміряні дані з акселерометра проєктуються з системи координат зв'язаної з тілом в ГСК. Перепроєктовані покази акселерометра порівнюються з достеменно відомим значенням (положенням горизонту) та знаходиться дельта-кватерніон Δq . Дельта-кватерніон схильний до наявності шуму. Автори використовуються методи лінійної інтерполяції дельта-кватерніону та одиничного вектору q_i . Отриманий ква-

терніон приймається як мультиплікативна складова корекції кватерніону орієнтації Рис. 23. Друга фаза – корекція. Кватерніон орієнтації послідовно множиться на отриманий дельта кватерніон, таким чином, теоретично, повинна відбуватися корекція гіроскопа.

Для вирішення задачі орієнтації кінцівок людини Хассен Фораті (англ. Hassen Fourati) запропонував новий комплементарний фільтр за принципом Калманівської фільтрації [71], котрий за точністю не поступається промислового XKF-3 від компанії Xsens [72].

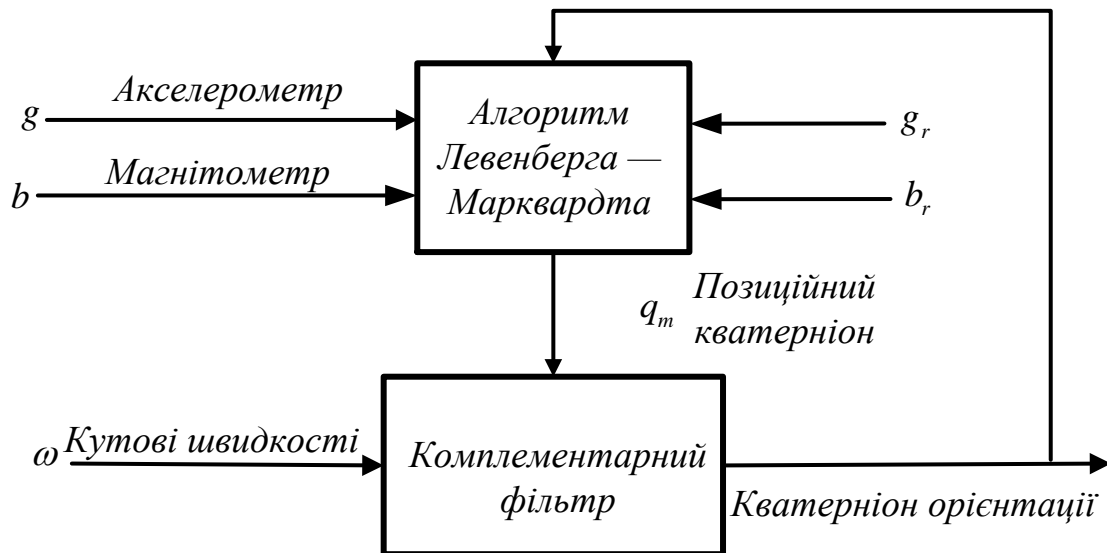


Рис. 24 Комплементарний фільтр підвищеної точності [72]

Суть методу полягає у знаходженні поправочного вектора-кватерніона. Для цього покази позиційних датчиків проєктуються в ГСК за даними попереднього положення. Зважаючи на високу частоту дискретизації та динаміку руху тіла, різниця між попереднім кутовим положення та поточним мала і не береться до уваги. Наступним кроком перепроєктовані дані порівнюються із достеменно відомими (положення площини горизонту та напрямок на магнітну північ). Використовуючи алгоритм Левенберга-Марквардта (оптимізований метод найменших квадратів) шукається адитивна коректуюча складова.

1.4 Висновки

Практично всі існуючі алгоритми безплатформних систем орієнтації, використовують для корекції всі складові вектора магнітного поля Землі. На перший погляд така постановка задачі має давати вигоду у точності, адже є надлишкова інформація у вигляді вертикальної складової магнітного поля Землі. Це дає можливість оцінювати кути крену і тангажу по двох векторах – вектору гравітаційного прискорення та вертикальній складовій магнітного поля, що, теоретично, дає змогу підвищити точність оцінки орієнтації. Однак, таке використання надлишкової інформації без розділення каналів (сигнали з акселерометрів для корекції по кутах крену і тангажу, з магнітометрів – лише по куту курсу чи ристання) на практиці приз-

водить до того, що в реальному середовищі система орієнтації може фіксувати незрозумілі варіації та збурення по горизонтальних каналах. Це виникає через схильність МПЗ до викривлення сторонніми об'єктами, такими як магніти, залізо, ефект електромагнітної індукції під час протікання електричного струму в провіднику. Використання сумарного вектору напруженості МПЗ призводить до ситуації, що після другого етапу корекції (по магнітометрах) вносяться похибки у результати корекції орієнтації на першому етапі (по акселерометрах).

Фізично, дуже важко розділити горизонтальну та вертикальну складові МПЗ, оскільки вони мають спільну природу. Тому у більшості розглянутих алгоритмах автори приймають умову, що об'єкт дослідження знаходиться в однорідному магнітному полі. Однак, в реальному житті користувач стикається з ситуацією коли отримані дані мають набагато гіршу точність від заявленої. Проявлення викривлення МПЗ сказується на роботі ІСЗРЛ та унеможливорює використання такого підходу. Звісно, повністю неможливо уникнути цього ефекту, однак існує можливість зменшення впливу. В таких випадках гостро постає питання можливості математичного розділення каналів.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ТА СИНТЕЗ АЛГОРИТМУ ОЦІНКИ ОРІЄНТАЦІЇ БЕЗПЛАТ- ФОРМНОЇ КУРСОВЕРТИКАЛІ З ПОКРАЩЕНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Захоплення руху людини, використовуючи інерціальні датчики, потребує чіткого відслідковування положення тіла при будь-яких кутах орієнтації сегментів, на які встановлені інерціальні вимірювальні блоки. Це призводить до неможливості використання для опису орієнтації кутів Ейлера-Крилова та відповідних кінематичних рівнянь зі їх схильність до виродження при кутах тангажу близьких до 90° . Кватерніони не мають такого недоліку. Також вони мають ряд переваг в порівнянні з класичними методами представлення орієнтації. Зважаючи, що розроблюваний алгоритм планується використовувати на мікроконтролері, кватерніонний методи представлення орієнтації є більш прийнятним.

Теорія оптимального оцінювання Калмана ґрунтується на припущенні, що нам повністю відомі стохастичні параметри сигналів, що беруть участь у процесі визначення орієнтації. На практиці це виявляється не завжди так. Через розкид параметрів виготовлення датчиків реальні шумові характеристики сигналу можуть відрізнятися від вказаних в специфікації. Розрахунок коефіцієнту підсилення Калмана потребує виконання обчислень з матрицями та пошук інверсної матриці розміром $n \times n$ на кожній ітерації виконання алгоритму. Для нелінійних задач, таких як оцінка параметрів руху людини, постає необхідність виконання лінеаризації та використання РФК. У цьому випадку необхідно виконувати лінеаризацію вимірювань та вектору спостереження, шукаючи Якобіан перетворення. Методи уникнення лінеаризації є складними та потребують додаткових ресурсів. Одним з них є спрощення в модель руху об'єкту, проте вони можуть стати джерелом додаткових алгебраїчних похибок.

Нелінійні методи регресійного аналізу є спрощеною формою оцінки найменших квадратів. Ці методи дозволяють оптимально мінімізувати квадрат похибки між вектором вимірювання та вектором оцінки. Метод оцінки найменших квадратів може бути виконаний за допомогою алгоритму Ньютона-Гауса або Левенберга — Марквардта. Такий підхід є більш оптимальним для використання в портативній техніці де постає питання в розмірах ІВБ та контролера. Відповідно, це що, в свою чергу, накладає певні обмеження у доступній обчислюваній потужності.

2.1 Базовий алгоритм

В якості базового алгоритму обрано доповняльний фільтр оцінки положення (ДФОП), запропонований Еріком Бахманом (англ. Eric Bachmann) [73]. Фільтр оцінює одиничний кватерніон орієнтації сегменту \hat{q} , беручи до уваги інформацію з трьох незалежних датчиків. Вхідні дані фільтру беруться з вимірювань трьохвісного акселерометра (h_1 h_2 h_3), трьохвіс-

ного магнітометра $(b_1 \ b_2 \ b_3)$, та тривісного гіроскопа представленого збіркою трьох взаємно-перпендикулярних ДКШ.

Кінематичне рівняння орієнтації в кватерніонній формі має вигляд

$$\dot{q} = q(0, \frac{1}{2}p, \frac{1}{2}q, \frac{1}{2}r) = \frac{1}{2}q^B \omega \quad (6)$$

де ${}^B\omega$ - вектор вимірювання кутових швидкостей. Інтегруючи кватерніон \dot{q} у відповідності до формули (2) отримуємо поточну оцінку кутового положення у кватерніонній формі \hat{q} . Через особливості інтегрування та властивості ДКШ, що описані в пункті 1.3, отриманий кватерніон достовірно відображає орієнтацію об'єкта лише малий проміжок часу. Для оцінки орієнтації протягом тривалого часу, використовується доповнююча інформація з додаткових датчиків. Блок-діаграма фільтра показана на Рис. 25.

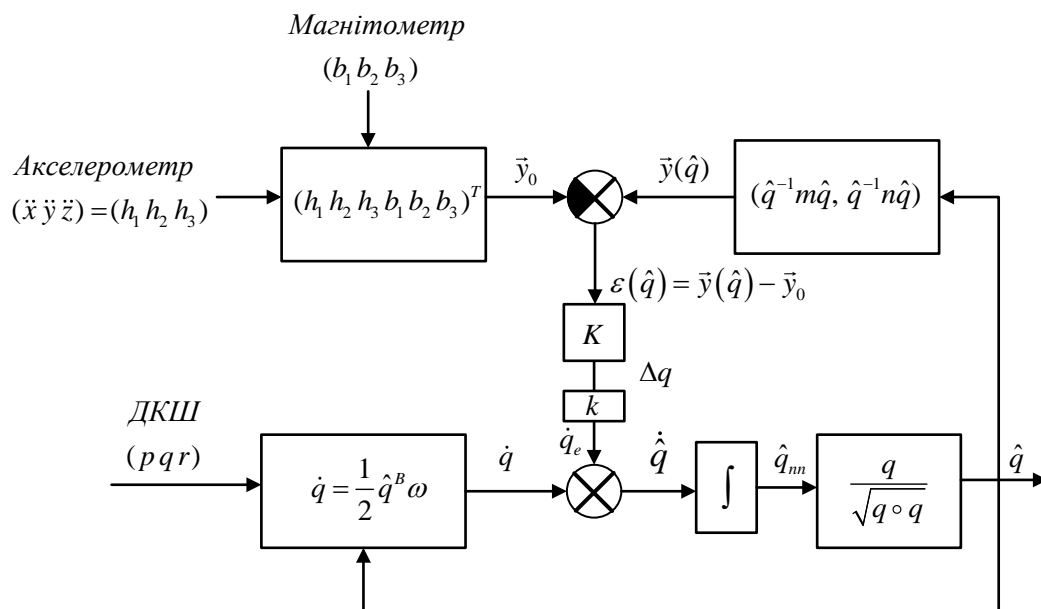


Рис. 25 Доповнювальний кватерніонний фільтр [73]

Акселерометр вимірює результуючу дії на тіло прискорення та прискорення сили тяжіння [74]

$$\vec{a} = \vec{W} - \vec{g}' \quad (7)$$

А тому цього вимірювання ідеально підходять для коректування оцінки орієнтації по кутам крену і тангажу, отриманої за сигналами гіроскопів. Аналізуючи характер руху кінцівок людини, дія додаткового прискорення має тимчасовий характер. Більшу частину часу тіло знаходиться в стані спокою або рухається поступально, а тому середнє значення прискорення W протягом тривалого часу приймаємо за 0. Рівняння (7) матиме вигляд

$$\vec{a} = -\vec{g}'. \quad (8)$$

Відповідний одиничний кватерніон матиме вигляд

$$n = [0 \quad n_1 \quad n_2 \quad n_3] = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]. \quad (9)$$

Тривісний магнітометр вимірює компоненти МПЗ b у зв'язаній СК [75]. Головна ціль магнітометра – спрямування продольної вісі об'єкту на магнітну північ та компенсація дрейфу оцінки орієнтації за сигналами гіроскопів навколо вертикальної вісі. У кватерніонній формі вектор вимірювань МПЗ має вид

$$m = [0 \quad m_1 \quad m_2 \quad m_3] \quad (10)$$

Для точного визначення вектору складових МПЗ m необхідно знати кути схилення, нахилання та сумарний вектор напруженості МПЗ H_0 (Рис. 26). Параметри МПЗ в конкретній точці проведення дослідження можуть бути виміряні або взяті зі спеціальних розрахункових таблиць.

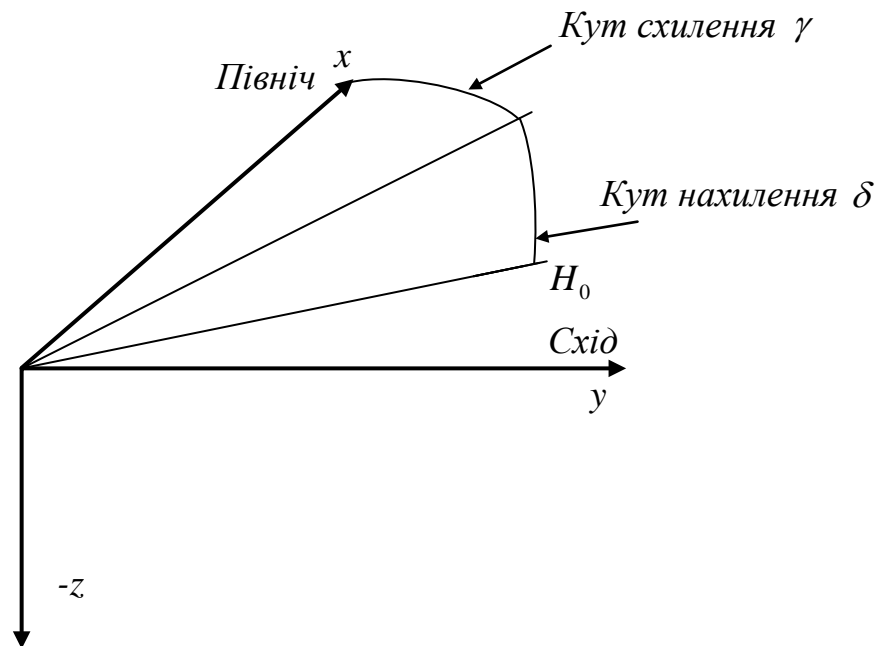


Рис. 26 Компоненти вектору магнітного поля Землі

Із врахування кутів схилення та нахилання, розпишемо рівняння (10)

$$m = \begin{bmatrix} 0 \\ H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0 \\ H_0 \cos \delta \cos \gamma \\ H_0 \cos \delta \sin \gamma \\ H_0 \sin \delta \end{bmatrix}^T. \quad (11)$$

Розглянемо будову ДФОП. Входом фільтру є виміряні нормалізовані покази трьохвісного акселерометра та магнітометра (Рис. 27).

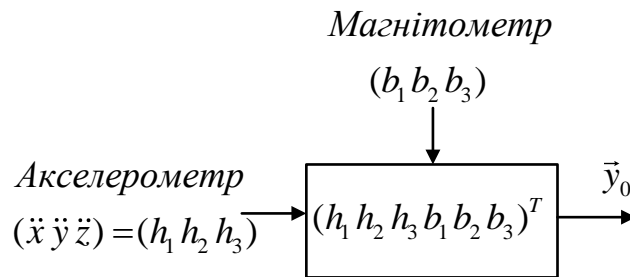


Рис. 27 Ліве верхнє плече ДФОП

Акселерометр вимірює проекції прискорення вільно падіння на осі чутливості у зв'язані з тілом системи координат. Запишемо отримані дані у кватерніонній формі у відповідності до рівняння (9)

$$h = [0 \quad h_1 \quad h_2 \quad h_3] \quad (12)$$

Складові МПЗ, виміряні магнітометром у зв'язаній з тілом системи координат, запишемо у відповідності до (10)

$$b = [0 \quad b_1 \quad b_2 \quad b_3] \quad (13)$$

Вектор-вимірювання \vec{y}_0 складається із поєднання векторної частини кватерніону h (12) та b (13).

$$\vec{y}_0 = [Ve(h), Ve(b)]^T = [h_1 \quad h_2 \quad h_3 \quad b_1 \quad b_2 \quad b_3]^T \quad (14)$$

Після розрахунку вектора-вимірювання фільтр оцінює розрахунковий вектор вимірювання $\vec{y}(\hat{q})$, використовуючи кватерніон орієнтації \hat{q} (праве верхнє плече). Для цього гравітаційний вектор (9) та вектор напруженості МПЗ (10) із ГСК перепроєктуються в СК, зв'язану з тілом шляхом повороту на кватерніон \hat{q}

$$\hat{h} = \hat{q}^{-1} n \hat{q} \quad (15)$$

та

$$\hat{b} = \hat{q}^{-1} m \hat{q}. \quad (16)$$

Для формування розрахункового вектора-вимірювання відкинемо скалярну частину отриманих кватерніонів (15) та (16) у відповідності до рівняння (14)

$$\vec{y}(\hat{q}) = [Ve(\hat{h}), Ve(\hat{b})]^T = [\hat{h}_1 \ \hat{h}_2 \ \hat{h}_3 \ \hat{b}_1 \ \hat{b}_2 \ \hat{b}_3]^T. \quad (17)$$

Вектор вимірювання (14) несе інформацію про поточний стан позиційних датчиків, в той час як розрахунковий вектор вимірювання (17) дає уявлення про ідеальні розрахункові сигнали позиційних датчиків для поточної орієнтації. Різниця між актуальними показами та розрахунковими формує вектор похибок

$$\vec{\varepsilon}(\hat{q}) = \vec{y}_0 - \vec{y}(\hat{q}) \quad (18)$$

$$\vec{\varepsilon}(\hat{q}) = \begin{bmatrix} h_1 - \hat{h}_1 \\ h_2 - \hat{h}_2 \\ h_3 - \hat{h}_3 \\ \hat{b}_1 - b_1 \\ \hat{b}_2 - b_2 \\ \hat{b}_3 - b_3 \end{bmatrix} \quad (19)$$

У випадку відсутності збурень та шуму датчиків різниця між виміряними значеннями та розрахунковими прямує до нуля, тобто $\vec{\varepsilon}(\hat{q}) \rightarrow 0$.

Критерій ведення корекції є квадрат вектору похибок

$$\vec{\varphi}(\hat{q}) = \vec{\varepsilon}^T(\hat{q})\vec{\varepsilon}(\hat{q}). \quad (20)$$

Існує доволі багато методів мінімізації квадрату похибки такі як метод Градієнтного спуску, алгоритм Левенберга-Марквардта, Флетчера-Рівса, тощо. У даному випадку автор запропонував використання алгоритму Ньютона-Гауса. оскільки збіжність алгоритму має квадратичну залежність до ітерації [76]. Стосовно розглядуваного алгоритму, розрахунковий вектор вимірювання $\vec{y}(\hat{q})$ – цільове значення, \vec{y} - вектор який потрібно коректувати. Корекція визначається за формулою

$$\Delta \vec{q} = -\frac{1}{2} \left[X^T X \right]^{-1} \nabla \vec{\varphi}, \quad (21)$$

де матриця X^T дана як

$$X_{ij}^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial y_i}{\partial q_j} \end{bmatrix}_{4 \times 6} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \vec{y}}{\partial q_0} \\ \frac{\partial \vec{y}}{\partial q_1} \\ \frac{\partial \vec{y}}{\partial q_2} \\ \frac{\partial \vec{y}}{\partial q_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial q_0} & \frac{\partial h_2}{\partial q_0} & \frac{\partial h_3}{\partial q_0} & \frac{\partial b_1}{\partial q_0} & \frac{\partial b_2}{\partial q_0} & \frac{\partial b_3}{\partial q_0} \\ \frac{\partial h_1}{\partial q_1} & \frac{\partial h_2}{\partial q_1} & \frac{\partial h_3}{\partial q_1} & \frac{\partial b_1}{\partial q_1} & \frac{\partial b_2}{\partial q_1} & \frac{\partial b_3}{\partial q_1} \\ \frac{\partial h_1}{\partial q_2} & \frac{\partial h_2}{\partial q_2} & \frac{\partial h_3}{\partial q_2} & \frac{\partial b_1}{\partial q_2} & \frac{\partial b_2}{\partial q_2} & \frac{\partial b_3}{\partial q_2} \\ \frac{\partial h_1}{\partial q_3} & \frac{\partial h_2}{\partial q_3} & \frac{\partial h_3}{\partial q_3} & \frac{\partial b_1}{\partial q_3} & \frac{\partial b_2}{\partial q_3} & \frac{\partial b_3}{\partial q_3} \end{bmatrix} \quad (22)$$

Підставимо рівняння (19) в (20), отримаємо вираз для $\vec{\varphi}(\hat{q})$

$$\varphi(\hat{q}) = [(\hat{h}_1 - h_1)^2 + (\hat{h}_2 - h_2)^2 + (\hat{h}_3 - h_3)^2 + (\hat{b}_1 - b_1)^2 + (\hat{b}_2 - b_2)^2 + (\hat{b}_3 - b_3)^2]. \quad (23)$$

Градiєнт квадрату похибки (20) має вигляд

$$\nabla \varphi(\hat{q}) = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \hat{q}_0}, \frac{\partial \varphi}{\partial \hat{q}_1}, \frac{\partial \varphi}{\partial \hat{q}_2}, \frac{\partial \varphi}{\partial \hat{q}_3} \right)^T = 2X_{4 \times 3}^T \varepsilon(\hat{q})_{3 \times 1} \quad (24)$$

Підставимо рівняння (24) в (21)

$$\Delta \vec{q} = -\frac{1}{2} \alpha [X^T X]^{-1} \nabla \varphi = -\alpha [X^T X]^{-1} X^T \varepsilon(\vec{q}) \quad (25)$$

де $0 < \alpha < 1$. Цей коефіцієнт визначає глибину корекції та залежить від рівня шумів датчиків.

Чим більше дисперсія шуму датчиків – тим менше значення коефіцієнту α . Для дискретного процесу визначається наступною формулою

$$\alpha = k \Delta t. \quad (26)$$

У результаті роботи алгоритму, вихідний кватерніон описується формулою

$$\hat{q}_{n+1} = \hat{q}_n + \frac{1}{2} \hat{q}_n^B \omega \Delta t + \alpha [X^T X]^{-1} X^T \varepsilon(\hat{q}_n) \quad (27)$$

Вихід фільтру – це нормований кватерніон орієнтації \hat{q} , котрий використовується для наступної оцінки орієнтації. Даний кватерніон орієнтації може бути використаний для графічного зображення руху об'єктів у віртуальному просторі або використовуватися іншими системами.

2.1.1 Математичне моделювання алгоритму БКВ

Як зазначав Ю. Лазарев [77], коливальний рух основи може призводити до появи похибок у визначення поточної орієнтації у роботі визначення орієнтації. Характер похибок оцінки кутів положення об'єкту має також коливальний характер з таким самим частотним спектром. У випадку, коли частоти коливання по двом вісям співпадають, виникає дрейф похибки виникнення визначення третього кута (постійне зростання середнього значення похибки з часом). За словами автора, дрейф такого роду похибок пояснюється випрямним ефектом, що виникає в наслідок наявності в рівнянні орієнтації мультиплікативних членів. Характерною рисою випрямного ефекту є суттєва його залежність від зсуву фаз між коливаннями основи по двох кутах. Залежність дрейфу від зсуву фаз має гармонічний характер. В якості основної характеристики точності алгоритмів є амплітуда цієї гармонічної залежності.

При розробці реального прототипу постає питання про вибір датчиків та їх вплив на точність роботи алгоритму. Через наявність адитивних похибок (таких як шум, незкомпенсованість зміщення нуля, температурні залежності) та мультиплікативних (таких як нестабільність масштабного коефіцієнту, перехресні зв'язки, температурна залежність) похибок у вихідних сигналах призводять до появи неточностей в алгоритмі роботи. Ці особливості відображаються на роботі системи та повинні бути враховані на стадії розробки.

Математичне моделювання дозволяє чисельно дослідити алгоритмічні та інструментальні похибки використовуваних алгоритмів. Для цього у середовищі Matlab було створено програмну модель, котра імітує рух основи на якій встановлено ІВБ. Додаткова модель блоку вимірювачів призначена для відтворення показів реальних датчиків, таких як акселерометр магнітометр та ДКШ. Блок обробки інформації слугує для оцінки орієнтації за отриманими сигналами датчиків.

Для оцінки статичної алгоритмічної точності було виконано дослідження, у якому було зафіксовано положення тіла нерухомо в просторі (Рис. 28 а). Похибка оцінки орієнтації у випадку використання ідеальних сигналів датчиків (відсутні додаткові завади та шум) прямує до 0 (Рис. 28 б) після завершення перехідного процесу (Рис. 28 в). Час перехідного процесу визначається величиною коефіцієнту k ; чим більше значення – тим швидше закінчується перехідний процес. У даному випадку, при коефіцієнті $k = 15$, система виходить на бажану точність за 10 тактів.

Розглянемо випадок кутового руху, при якому виконується лінійне наростання одного чи декількох кутів орієнтації з часом. Для проведення дослідів, встановимо кут крену $\theta - 30^\circ$, а кут курсу ψ поступово змінювати від 0° до 180° . При такому русі, похибка складає $0,035^\circ$ по осі, навколо якої обертається тіло. Такий ефект пояснюється наявністю фазової затримки (Рис. 29). Ця фазова затримка з'являється під час отримання оціненого вектора вимірювання

$\bar{y}(\hat{q})$ (17). У ході чисельних досліджень було встановлено, що похибка, викликана фазовою затримкою, пропорційно залежить від частоти дискретизації сигналу (частоти роботи алгоритму). Чим більша частота дискре-

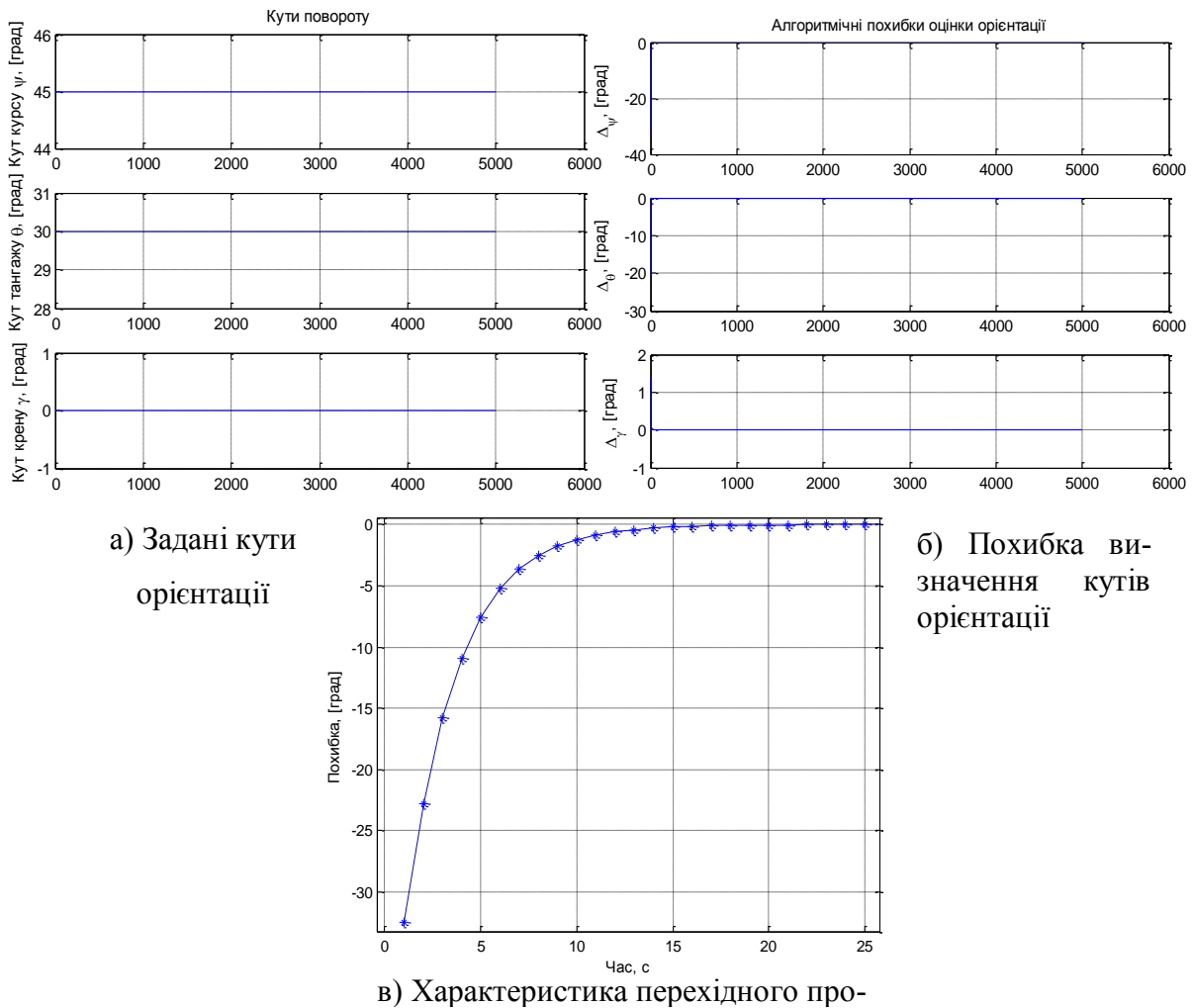


Рис. 28 Дослідження статичної точності

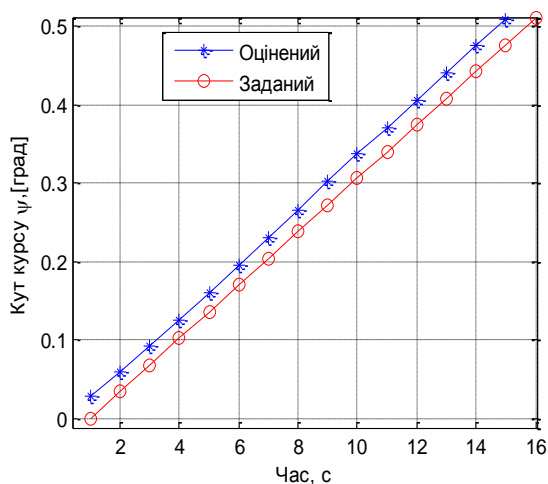


Рис. 29 Фазова затримка, частота дискретизації 100 Гц

тизації – тим менша похибка. Цю особливість слід враховувати при впровадженні розглянутого алгоритму в реальний прилад, оскільки частота роботи процесору може бути обмежена.

Розглянемо більш не сприятливу модель руху тіла – двовісну хитавицю [77]. Для цього задамо гармонічний рух по кутам крену і тангажу з різним амплітудами та частотами (Рис. 30).

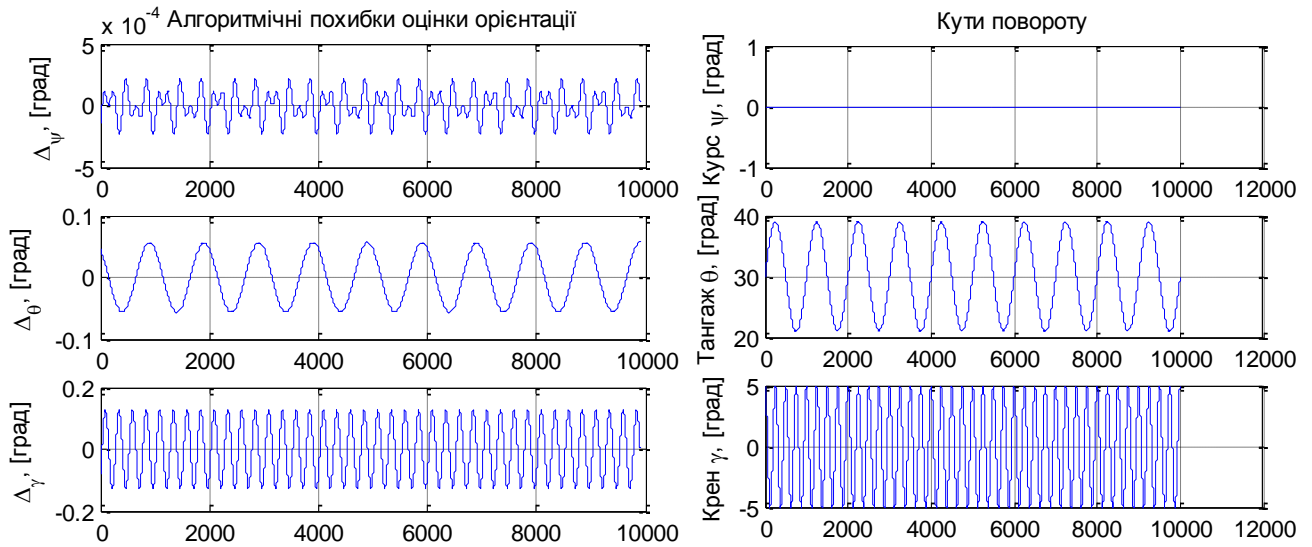


Рис. 30 Гармонійний рух основи

Динамічна точність роботи алгоритму ІСЗРЛ сягає 0.04° (СКВ) по куту θ та 0.1° (СКВ) по куту γ , при амплітудних похибках 0.1130° та 0.2496° відповідно. Слід зауважити, що дрейфу по третій вісі не спостерігається. Характер похибки має гармонійний характер. Середнє значення похибки близьке до 0, це означає що корекція гіроскопа проводиться правильно, дрейф гіроскопа не спостерігається.

Розглянемо нештатний режим роботи. Зважаючи на схильність МПЗ до викривлення навколишніми факторами. Для перевірки впливу сильно викривленого МПЗ змодельємо ситуацію піднесення неодимового магніту до датчика. Це призводить до різкої зміни показів приладу. Для цього в певний момент часу на вхід магнітометричного каналу подається сильно викривлений сигнал (Рис. 31 в)). Це означає, що магнітометри увійшли в насичення. Через деякий час, завада прибрана та покази вертаються до норми. На графіках похибок (Рис. 31 б)) видно, що в момент появи завад, виникає похибка по всім трьом кутам. У даний момент прилад працює абсолютно не коректно та його використання неможливо. Джерело цієї похибки знаходиться у проблемі перевизначеності системи, а саме впливу вертикальної складової МПЗ на визначення положення горизонту. Ця проблема детально висвітлена в роботі С. Лакози [78], [79]. Таким чином, кути крену і тангажу мають три джерела похибок : магнітометричний, акселерометричний та гіроскопічний. Підвищення завадостійкості полягає в розділенні каналів корекції. Тобто акселерометричний канал – слугує для компенсації дрейфу гіроскопів по кутам крену і тангажу, магнітометричний лише по куту курсу.

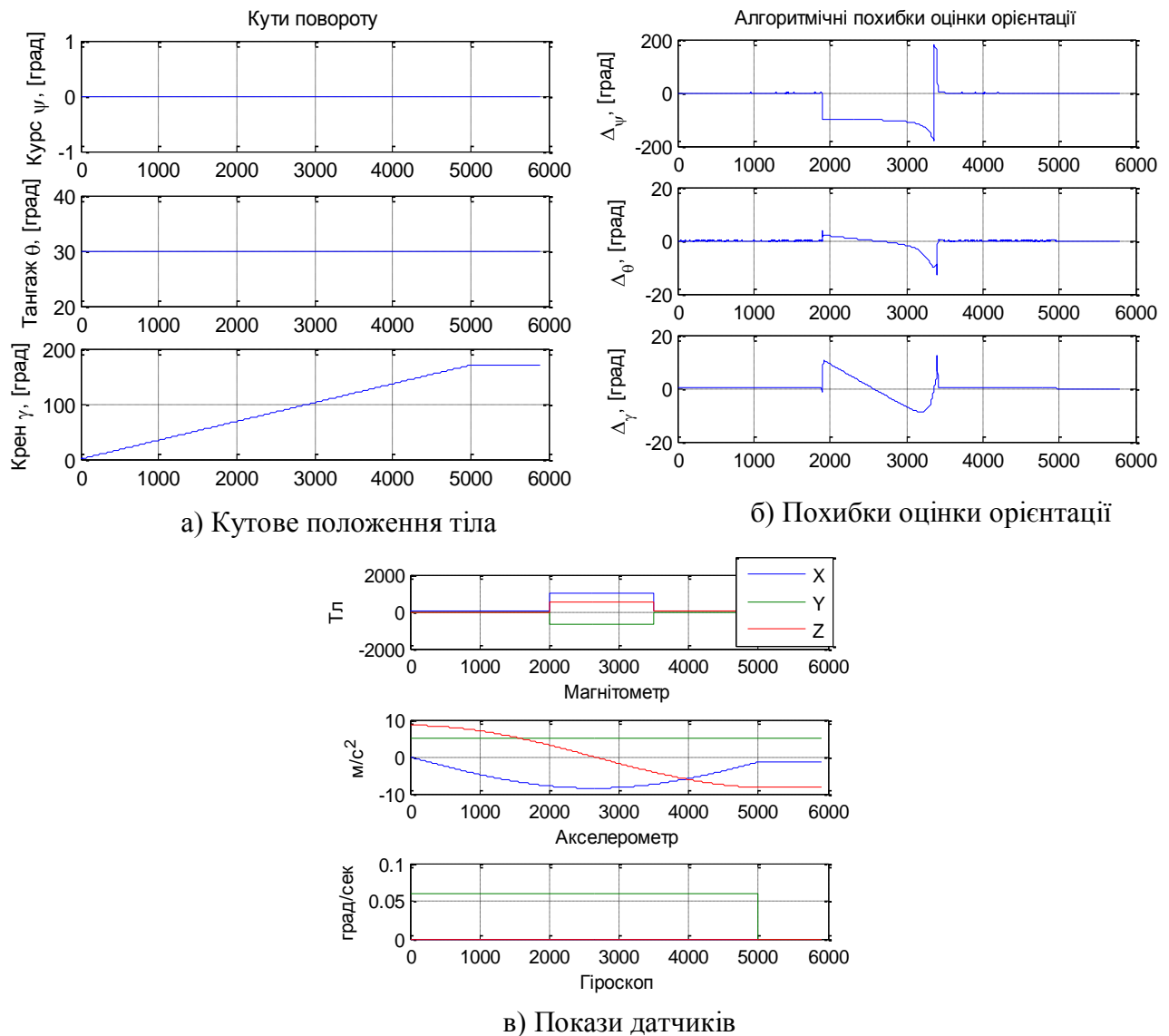


Рис. 31 Дослідження впливу магнітних збурень

2.2 Методи підвищення точності алгоритмів орієнтації

Завадостійкість – поняття, що характеризує здатність системи протистояти дії завад. Особливо гостро постає питання стійкості роботи по відношенню до впливу магнітних завад. Можливість визначення курсу підвищує надійність та точність всієї системи. У даній частині представлені рішення, що дозволяють підвищити точність та завадостійкості розглянутого алгоритму.

2.2.1 Методи розділення каналів

Розділення каналів полягає у зменшенні перехресних завад у каналах корекції. Іншими словами, ці методи дозволяють зменшити вплив курсового каналу на канали визначення кутів крена та тангажа. German A. у своїй роботі [76] використовував аналітичний компас для

визначення кута курсу і акселерометр для визначення куту крену і тангажу. Корекція проводилася окремо по кожному із кутів. Два різні коефіцієнти корекції K_1 та K_2 дозволяють гнучко налаштувати систему. Однак, ця система має точки сингулярності, ефект складання рамок та неможливість визначення курсу при кутах крену $\pm 90^\circ$.

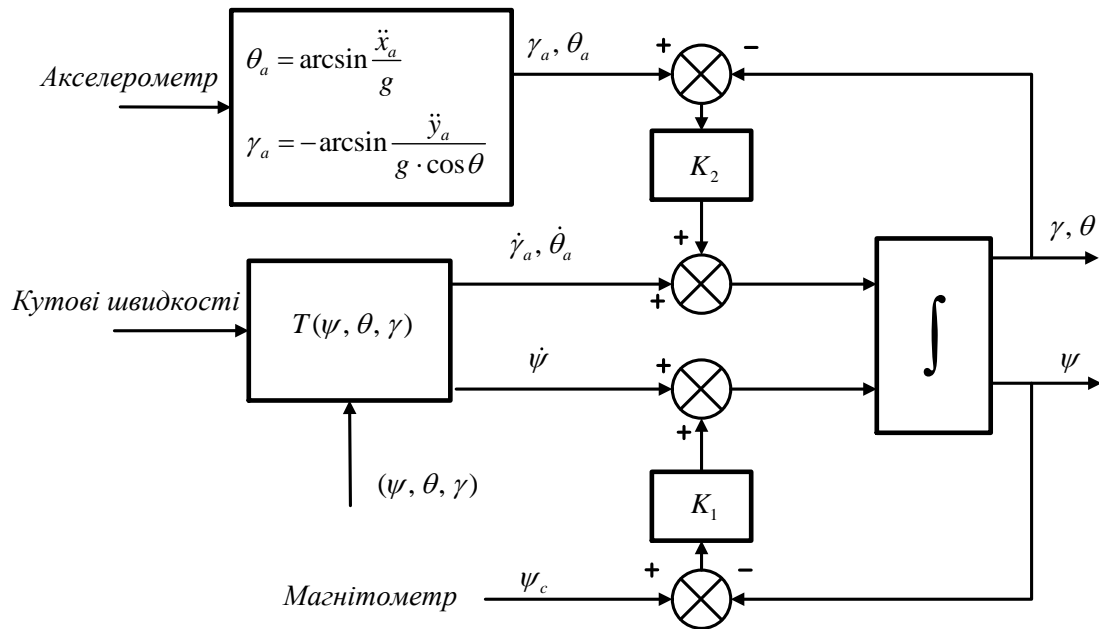


Рис. 32 Система з розділенням каналів [76]

Л

акоза С. Мелешко В. [78], запропонували не брати до уваги вертикальну складову магнітометра. Оскільки, для оцінки курсу достатньо двох проекцій на горизонтальні вісі – третя складова має надлишкову інформацію. У запропонованому методі формування МНК виконується на різних етапах корекції. Виконуючи корекцію МНК, отриманої після інтегрування даних ДКШ, третій стовпчик потрібно брати з етапу корекції по акселерометрах, а другий стовпчик - з етапу корекції по магнітометрах. Необхідно зазначити, що такий принцип отримання кінцевого результату може застосовуватися лише при використанні у якості кінематичних параметрів МНК.

Запропонований метод для розділення каналів за принципом схожий до алгоритму, запропонованого К. Fengta ін. [54].

$$\mathbf{v}_{mxz} = \begin{bmatrix} \sqrt{b_x^2 + b_z^2} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

Різниця між оціненим вектором \mathbf{v}_{mxz} та достеменно відомим $\mathbf{v}_N = [1 \ 0 \ 0]$ буде вказувати на азимутальне положення. Щоб отримати кватерніон, що буде включати азимутальне положення, слід повернути кватерніон орієнтації q на оцінений курс θ .

$$q_m = \cos\left(\frac{\Delta\theta_m}{2}\right) + \vec{n} \sin\left(\frac{\Delta\theta_m}{2}\right) \quad (29)$$

За допомогою скалярного множення, знаходиться кватерніон переходу від поточного положення до положення на магнітну північ. Поворот кватерніона орієнтації на азимутальний кут матиме вигляд:

$$q_m = q_{me} \bullet q_a \quad (30)$$

Суть запропонованого методу полягає в тому, що покази магнітометра проектується в площину горизонту, використовуючи знання про орієнтацію тіла з попереднього кроку, з наступним обнуленням вертикальної складової МПЗ.

Представимо вимірювання магнітометра у вигляді кватерніона:

$$b = [0 \quad b_1 \quad b_2 \quad b_3] \quad (31)$$

де скалярна частина w нульова, а елементи $b_1 \quad b_2 \quad b_3$ покази магнітометра по вісям $X \ Y \ Z$ відповідно.

Для перепроєктування показів магнітометра в площину горизонту, скористуємось кватерніоном орієнтації \hat{q} . Для малих дискретів часу запізнення на 1 крок буде не суттєвим. Поворот вектора b в площину горизонту описується рівнянням:

$$b_q = \hat{q} b \hat{q}^{-1} \quad (32)$$

Отриманий кватерніон b_q описує покази магнітометра в ГСК. Оскільки для обрахування інформації про азимутальне положення прокольної осі достатньо інформації тільки по горизонтальним каналам, складову по вісі Z прирівнюємо до нуля:

$$b_q = [q_0 \quad q_1 \quad q_2 \quad 0] \quad (33)$$

Прибравши вертикальну складову МПЗ, необхідно перепроєктувати кватерніон b_q із ГСК у вісі, зв'язані з тілом. Для цього виконаємо зворотній поворот b_q на кватерніон \hat{q} :

$$b_z = \hat{q}^{-1} b_q \hat{q} \quad (34)$$

Блок діаграма фільтру із вище описаними змінами показано на Рис. 33. Ще одним методом зменшення похибок по магнітометричному каналу – є проведення калібровок датчиків та визначення реальних параметрів вихідного сигналу.

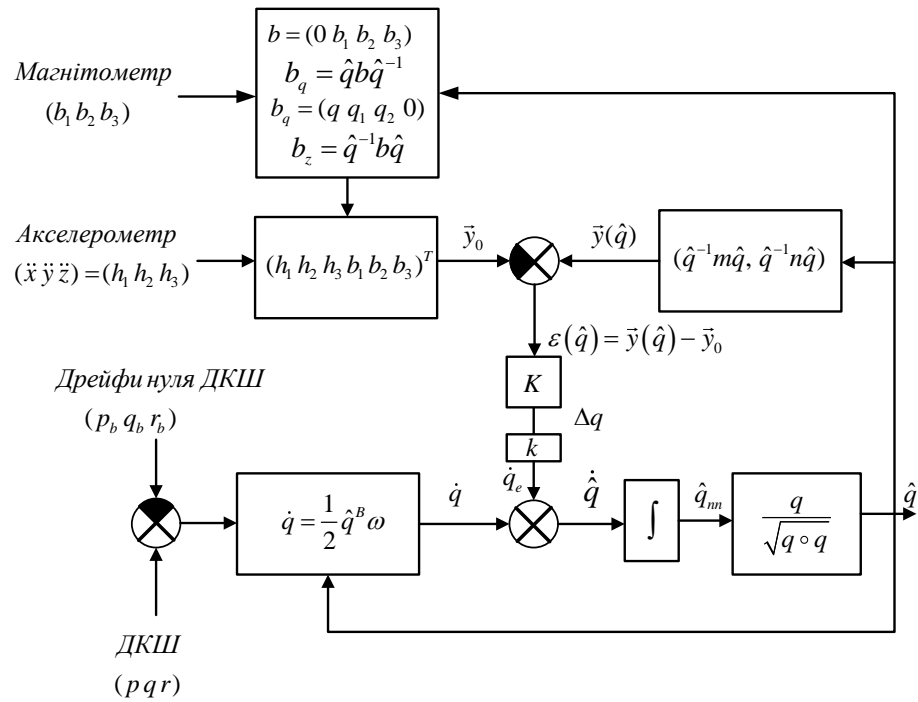


Рис. 33 Комплементарний фільтр Бахмана із розділенням каналів

Додаткові маніпуляції з поворотом вектора на кватерніон орієнтації \hat{q} є доволі не раціональним підходом через відносно велику кількість додаткових математичних операцій. Фізичний зміст розглянутих операцій полягає в тому, щоб розкласти кватерніон вимірювання по сигналу магнітометра на дві складові: вертикальну та горизонтальну. Математично існує можливість розкладу кватерніона по заданому напрямку [80]. Розглянемо довільний кватерніон a і довільне положення у просторі, вздовж якого буде проходити розклад, задане напрямними косинусам k_1, k_2, k_3

$$k_1^2 + k_2^2 + k_3^2 = 1. \quad (35)$$

У такому випадку кватерніон a можна представити у вигляді суми двох кватерніонів

$$a = ac + an \quad (36)$$

Де кватерніон ac колінеарний заданому напрямку і виражається формулою

$$ac = [a_0 \quad k_1 \cdot vac \quad k_2 \cdot vac \quad k_3 \cdot vac] \quad (37)$$

Де

$$vac = k_1 \cdot a_1 + k_2 \cdot a_2 + k_3 \cdot a_3 \quad (38)$$

Кватерніон an нормальний до ac

$$an = a - ac \quad (39)$$

Таким чином, отриманий кватерніон an позбавлений інформації про вертикальну складову. Фізичний принцип полягає у використанні оцінених показів акселерометра, як вектор вздовж якого проводиться розклад кватерніону вимірювання магнітного поля. В розкладі беруть участь оцінені покази акселерометра. На відміну від вимірних показів, вони менш схильні до впливу завад через використання фільтрації по гіроскопам гіроскопічному каналу. Після розкладу отримуємо дві складові кватерніону вимірювання магнітометра: колінеарну з вектором вздовж якого проводиться розклад та векторну, перпендикулярну до колінеарної частини. Колінеарна частина несе інформацію про вертикальну складову, в той час як векторна про горизонтальні складові МПЗ. Використання запропонованого підходу потребує в 12 разів менше операцій для розділення каналів ніж попередньо розглянутий підхід (348 операцій для методу із подвійним поворотом вектора на кватерніон q (Рис. 33) проти 29 при кватерніонному розкладі). Структурна схема алгоритму із оптимізацією розділення каналів має вигляд схожий до Рис. 33

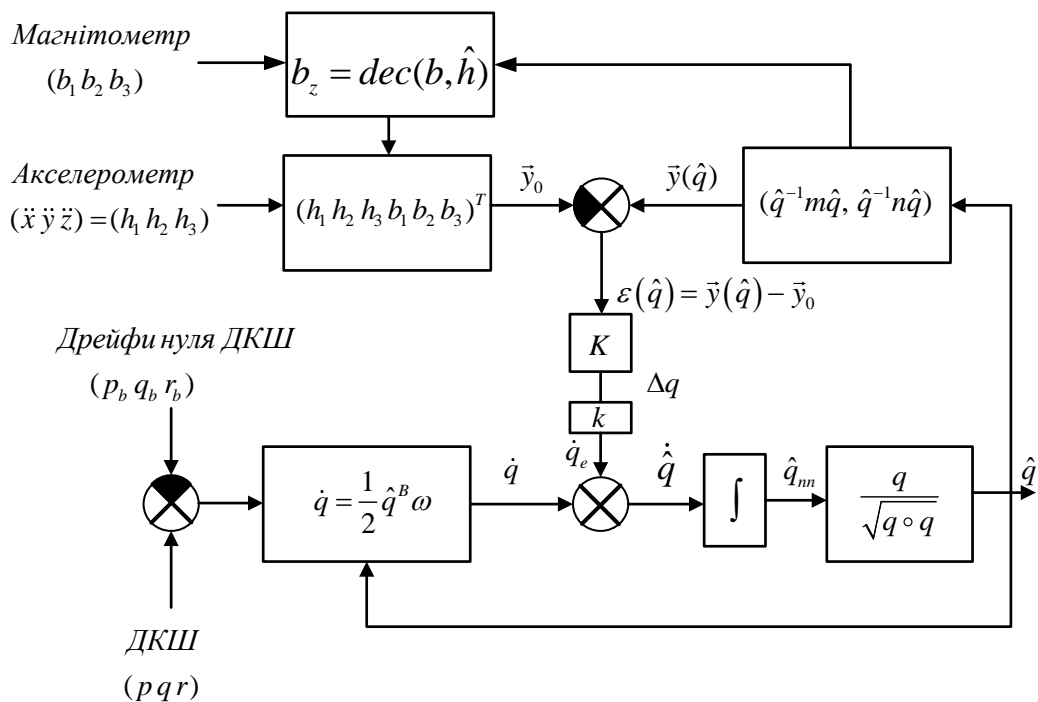


Рис. 34 ДФОП із швидким розділення каналів

2.2.2 Обмеження глибини корекції та запобігання фазовому розузгодженню

Аналізуючи графіки, показані на Рис. 31, видно, що під час збурення по магнітному каналу унеможливується визначення курсу об'єкта. N. Yadav та C. Bleakley [79] запропонували стежити за збуренням оточуючого магнітного поля та використовувати адаптивну фільтрацію. Автори перепроєктовують покази магнітометра в ГСК за допомогою показів акселерометрів, використовуючи матриці напрямних косинусів. Критерієм введення корекції слу-

гує кут схилення. Величина корекції пропорційна різниці ідеальних показів кута схилення та реальних. Головним недоліком такого підходу є використання напрямних косинусів для проєктування показів магнітометрів в ГСК, що потребує додаткових ресурсів. Виміряні кути відхилення від горизонту можуть бути не точними, у випадку наявності додаткового прискорення або вібрації об'єкту. Це спричинить внесенню мультиплікативної похибки в канал вимірювання курсу.

Авторами експериментально доведено ефективність використання такого методу фільтрації як на повільних, так і на швидкорухомих об'єктах. Приріст точності сягнув 7° по відношенню до компенсації магнітних збурень по введених статичних гіпотез про можливу поведінку феромагнітних завад. Однак, невідомо що саме показує ця величини і при яких параметрах отримано приріст точності (динаміка чи статика) та невідомий час впливу завади.

Більш вдосконалена система нівелювання магнітних збурень запропонована К. Feng та ін. [54]. Автори пропонують вимірювати сумарну горизонтальну складову МПЗ та порівнювати із розрахунковим значенням $\|m^b\| - \|h\| > x_m$, де $\|m^b\|$ - виміряне значення, $\|h\|$ - розрахункове значення, є константою, x_m - критерій введення корекції. Зважаючи на величину x_m вводиться відповідний коефіцієнт $0 < K_m < 1$. Покращеним способом спостереження за збуренням є використання повного вектора напруженості МПЗ. Аналогічно для акселерометричного каналу по величині дії додаткового прискорення $\|a^b\| - \|g\| > x_a$, вводиться коефіцієнт $0 < K_a < 1$.

Введення слідкуючого пропорційного регулятора дозволяє вимикати корекцію по магнітометричному та акселерометричному каналах роздільно. Зважаючи на тимчасовий характер дії магнітної завади та прискорення, дрейф гіроскопів не має призводити до суттєвого наростання похибки в каналах корекції. Однак в порівнянні із ввімкненою системою корекції отримується значний приріст в точності. Під час магнітного збурення зберігається можливість визначення всіх кутів орієнтації і навіть кута курсу.

Зменшення похибок від фазового запізнення досягається шляхом підвищенням частоти роботи алгоритму або додавання пристрою вибірки і зберігання даних (ПВЗД). Перший метод не завжди раціональний через апаратні обмеження. Додавання пристрою вибірки і зберігання дає можливість затримувати сигнали датчиків на 1 такт. Затримка синхронізує вектор вимірювання, отриманий із датчиків та оцінений вектор вимірювання, розрахований із кватерніона орієнтації. Запропонований пристрій може бути виконаний як апаратно, так і програмно.

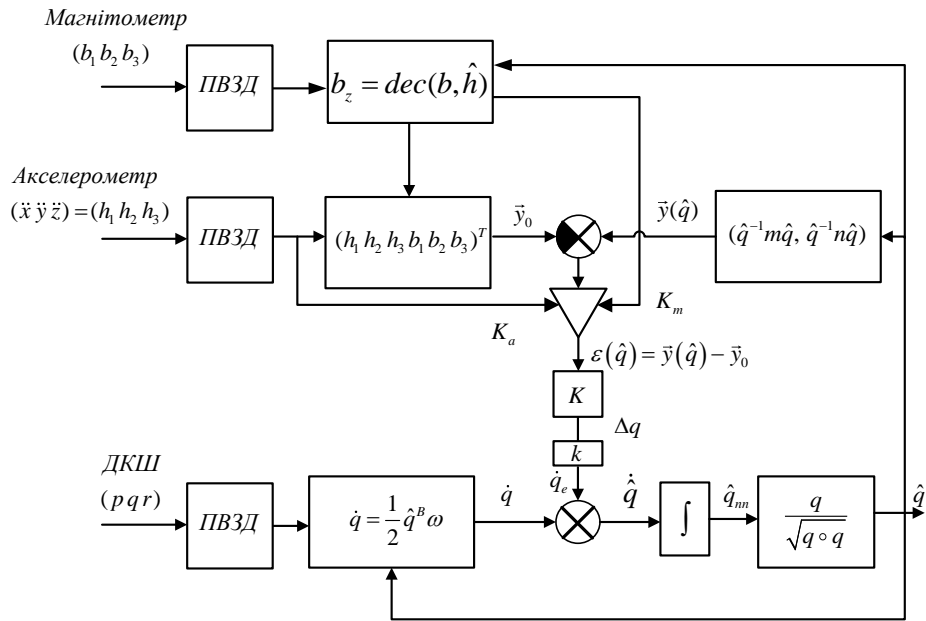


Рис. 35 Блок-діаграма покращеного алгоритму

Під час проведення моделювання виявлено, що алгоритм виходить в стаціонарний режим роботи після 10 тактів роботи алгоритму (Рис. 28 в). Зменшення цього часу може досягатися шляхом проведення початкової виставки. Для цього перед пуском алгоритму зчитуються дані з акселерометра та магнітометра. За показами позиційних датчиків, визначаються початкові кути крену і тангажу.

$$\begin{aligned}\theta_0 &= \arcsin(a_y / g), \\ \gamma_0 &= -\arctg(a_x / a_z), \\ g &= \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}.\end{aligned}\tag{40}$$

де a_x , a_y , a_z - складові прискорення сили тяжіння на вісі чутливості акселерометрів. Кути θ_0 , γ_0 - описують положення відносно поточної вертикалі. Для визначення початкового кута орієнтації в азимуті, використовується магнітометр. Азимутальний кут ψ визначається формулою

$$\psi = \arctg \left(\frac{T_x \cos \gamma_0 + T_y \sin \gamma_0}{(T_x \sin \gamma_0 - T_y \cos \gamma_0) \cos \theta_0 + T_z \sin \theta_0} \right)\tag{41}$$

Де значення T_x , T_y , T_z - виміряні за допомогою магнітометра проекції МПЗ на вісі чутливості датчиків; кути θ_0 , γ_0 - кути відхилення від горизонту (40). Початковий кватерніон

q_0

$$q_0 = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\psi_0}{2} \cos \frac{\theta_0}{2} \cos \frac{\gamma_0}{2} + \sin \frac{\psi_0}{2} \sin \frac{\theta_0}{2} \sin \frac{\gamma_0}{2} \\ \cos \frac{\psi_0}{2} \sin \frac{\theta_0}{2} \cos \frac{\gamma_0}{2} + \sin \frac{\psi_0}{2} \cos \frac{\theta_0}{2} \sin \frac{\gamma_0}{2} \\ \cos \frac{\psi_0}{2} \cos \frac{\theta_0}{2} \sin \frac{\gamma_0}{2} - \sin \frac{\psi_0}{2} \sin \frac{\theta_0}{2} \cos \frac{\gamma_0}{2} \\ \cos \frac{\psi_0}{2} \sin \frac{\theta_0}{2} \sin \frac{\gamma_0}{2} - \sin \frac{\psi_0}{2} \cos \frac{\theta_0}{2} \cos \frac{\gamma_0}{2} \end{bmatrix} \quad (42)$$

Отриманий кватерніон використовується, як початкове значення під час інтегрування на першому кроці роботи алгоритму.

2.3 Моделювання покращеного ДФОП

Для порівняння точності роботи алгоритму із запропонованими покращенням необхідно виконати моделювання за методикою, описаною в розділі 2.1.1. Для спрощення порівняння отриманих результатів із попередньо проведеними дослідженнями, слід обрати такі ж самі умови проведення тесту.

Першочергово, проведемо дослідження статичної похибки роботи алгоритму із підвищеною завадостійкістю в умовах стаціонарної роботи. Для цього задамо кути орієнтації

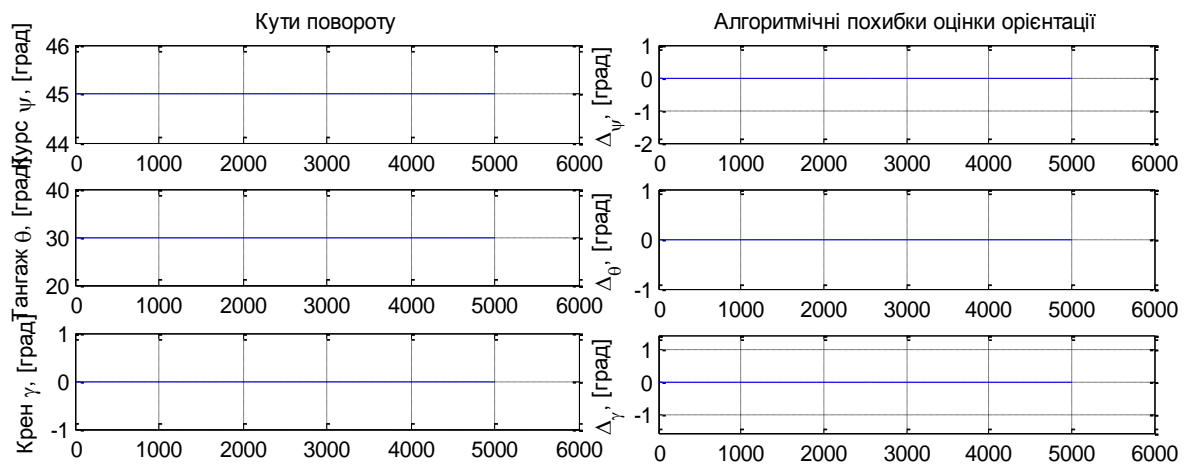


Рис. 36 Статична похибка запропонованого алгоритму

об'єкту $\psi = 45^\circ$, $\theta = 30^\circ$, $\gamma = 0^\circ$.

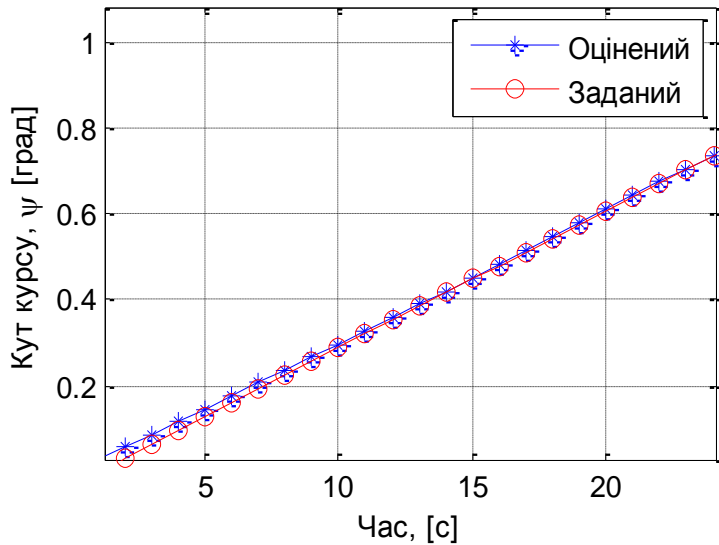


Рис. 38 Накладення реальних та оцінених значень куту орієнтації

На Рис. 36 зображено результати моделювання із вищеописаними вдосконаленнями. В даному випадку алгоритмічна похибка близька до програмної точності обрахунку середовища Matlab, тобто близька до 0. Через виконання початкової виставки відсутній початковий перехідний ефект при старті алгоритму. Однак, перехідний процес, при однакових налаштуваннях, не зміни-

вся. Система відпрацьовує стрибкоподібну зміну за 10 тактів. Ця особливість впливає із ітеративного методу оптимізації Ньютона-Гауса, котрий потребує декількох ітерацій для досягнення бажаної точності. Внесення ПВЗД в сигнальний тракт приборів виявлену фазову затримку Рис. 38. Особливістю ПВЗД є наявність статичної затримки даних на 1 такт роботи алгоритму. При умові мінімальної частоти дискретизації 50Гц, вона сягатиме 20мс. Ця величина є не суттєвою та може бути знехтуваної, однак слід пам'ятати про цю особливість у

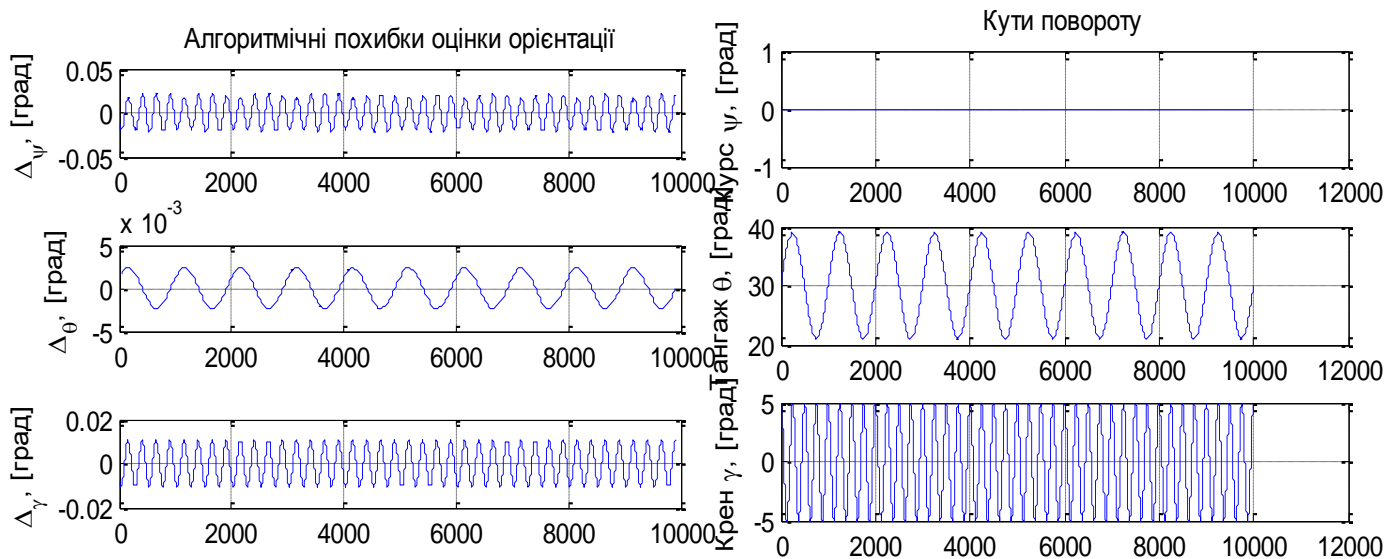


Рис. 37 Гармонійний рух основи покращеного алгоритму

випадку необхідності досягнення великої швидкості відклику.

Наступний крок – перевірка динамічної точності. Відповідно до [77] та п. 2.1.1, задамо тілу двовісну качку по куту тангажу θ з амплітудою 9° при частоті 0.1 Гц і тангажу γ з амплітудою 5° і частотою 0.4 Гц (Рис. 37).

Динамічна методична похибка роботи вдосконаленого алгоритму сягає 0.0017° СКВ по куту θ та 0.0074° СКВ по куту γ . Характер похибки має гармонійний характер. Амплітуда похибки залежить від частоти дискретизації сигналу. Середнє значення похибки близьке до 0 та є незмінним у часі. Це свідчить про відсутність дрейфу і, як наслідок, про правильність визначення орієнтації.

Перевіримо реакцію системи при нештатному режимі роботи, моделюючи роботу систему під час різкого магнітного збурення відповідно до розділу 2.1.1. Результати моделювання представлені на Рис. 39

У порівнянні результатів, отриманих на Рис. 31, покращений алгоритм орієнтації має значно

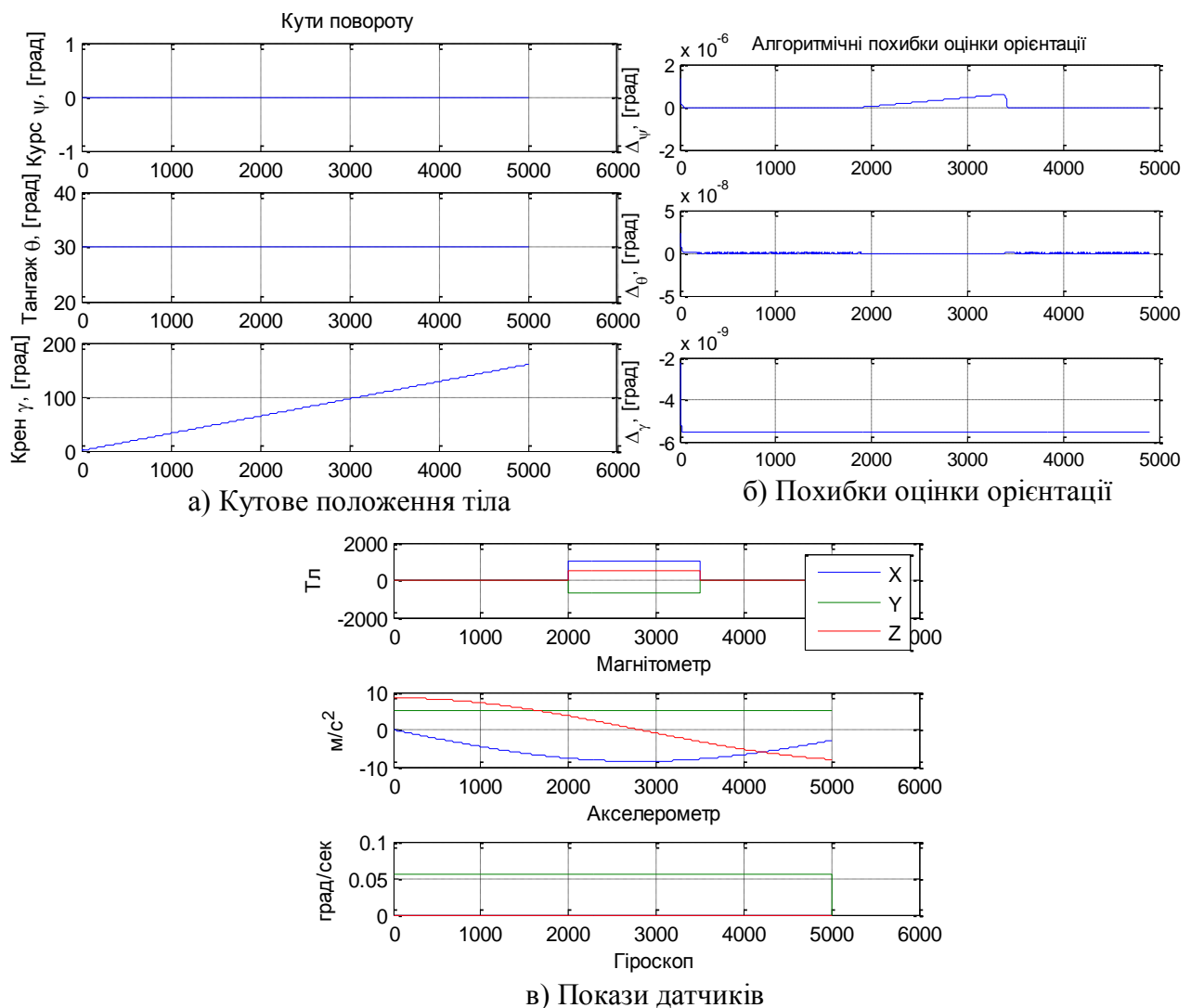


Рис. 39 Дослідження впливу магнітних завад на роботу вдосконаленого алгоритму

кращі показники точності в момент дії магнітних завад. Заходи щодо розділення каналів корекції значно зменшують перехресні зв'язки акселерометричного та магнітометричного ка-

налів, це видно на Рис. 40. Через стрибкоподібний характер зміни магнітного поля, на графіках точності визначення кутів орієнтації спостерігаються викиди. Оскільки характер зміни магнітних завад має більш поступове наростання, цими похибками можна знехтувати.

Для зменшення впливу магнітних завад використано слідкуючий П-регулятор, котрий зменшує глибину корекції. В момент досягнення вимірювань магнітометрів порогового значення, корекція по азимутальному каналу вимикається зовсім. Це дає змогу визначати азимутальне положення навіть під час дії завади. В момент вимкнення корекції, точність визна-

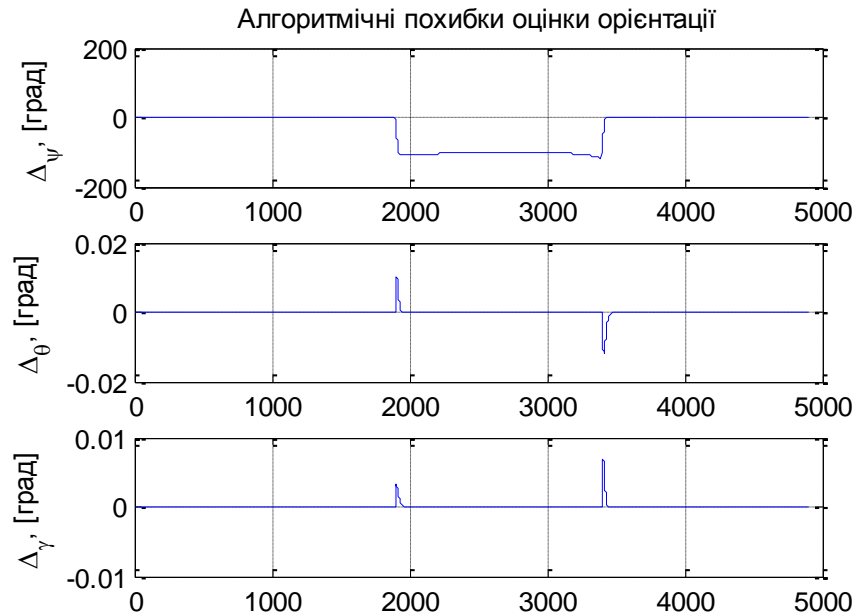


Рис. 40 перехресні зв'язки без слідкуючого регулятора

чення залежить від дрейфу гіроскопа.

2.4 Висновки

У даному розділі представлено опис вихідного алгоритму орієнтації. Для підтвердження можливості досягнення бажаної алгоритмічної точності, проводилося математичне моделювання обраного алгоритму. В процесі моделювання виявлено деякі особливості. Головною особливістю є відсутність розділення каналів корекції визначення кутів визначення азимутального кута та кутів відхилення від площини горизонту. МПЗ схильне до викривлення через навколишнє середовище. Ці викривлення призводять до неточності у визначенні складових МПЗ. Через наявність перехресних зв'язків між акселерометричним та магнітометричним каналах, похибка спостерігається не лише у визначенні азимутального, а і горизонтальних кутів див. Рис. 31. Для вирішення цієї особливості запропоновано два методи розділення каналів корекції. Перший метод використовує кватерніон орієнтації з попереднього кроку роботи алгоритму для проектування вимірюваних значень магнітометра в ГСК. Розділен-

ня каналів досягається шляхом відкидання вертикальної складової. Далі, використовуючи кватерніонне множення, оновлені дані проєктуються із ГСК в систему координат зв'язану з тілом.

Другий метод полягає у розкладі кватерніона, утвореного із вимірювання магнітометра, вздовж напрямку місцевої вертикалі. В якості вектора, що описує положення вертикалі використовуються розрахункові покази акселерометра. Після розкладу отримуємо вектор, колінеарний обраному напрямку та перпендикулярний до нього кватерніон. Саме отриманий кватерніон несе інформацію лише про горизонтальну складову МПЗ в системі координат, зв'язаній з тілом.

Використання слідкуючого П-регулятора вимикає ведення корекції по азимутальному каналу під час дії магнітної завади. Це дозволяє протягом короткого часу з певною точністю зберігати можливість оцінювати азимутальне положення тіла. Під час моделювання вихідного алгоритму знайдена фазова затримка на 1 такт роботи алгоритму. Введення ПВЗД дозволяє вирішити цю проблему, однак вносить статичну затримку даних на 1 такт. Необхідно мати на увазі цю особливість під час побудови високошвидкісних схем.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТА СТВОРЕННЯ ПРОТОТИПУ ІНЕРЦІАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЗАХОПЛЕННЯ РУХУ ЛЮДИНИ

Прилад, у котрому встановлені датчики ІВБ та обчислюючий пристрій, отримав назву безплатформна курсовертикаль (БКВ), (англ. Attitude and Heading Reference Systems). Прототип СЗРЛ складається із декількох автономних БКВ, базового бездротового приймача, підсистеми збору даних та відтворення анімації. Структурно-функціональна схема системи показана на Рис. 41.

Кожна із автономних БКВ має власне джерело живлення, датчики, модуль обрахунку орієнтації та радіопередавач. Програмне забезпечення БКВ, виконує опитування та зберігає дані в пам'яті модуля. По завершенню опитування, інформація передається на ПК для обробки в алгоритмах підсистем збору даних та відтворення анімації для візуалізації, або записується в файл.

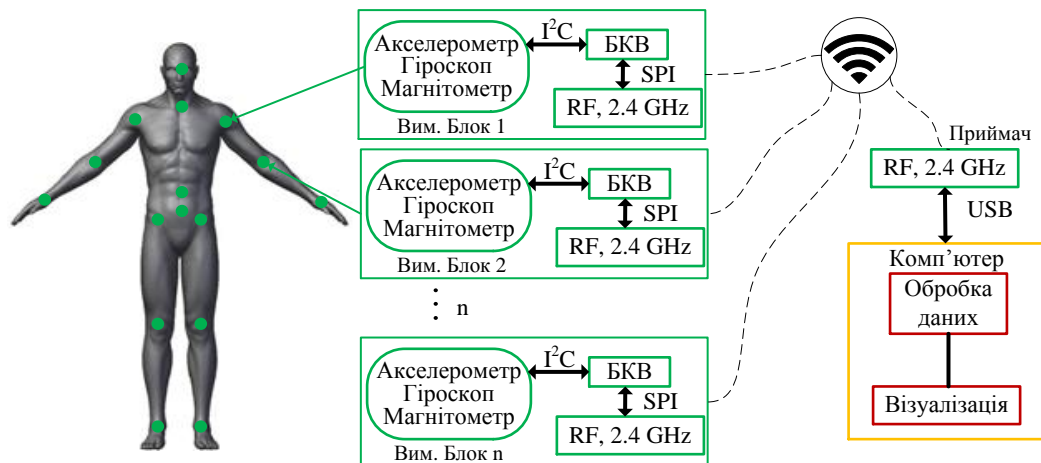


Рис. 41 Структурно-функціональна схема інерціальної системи захоплення руху

3.1 Біомеханічна модель тіла людини

Тіло людини є складною системою, котра складається з понад 200 кісток, 600 м'язів та незчисленної кількості нервових волокон, що керують їх рухом. У біомеханічній моделі сегменти-кістки з'єднуються шарнірами - суглобами. В найпростішому випадку суглоб обертається навколо одної вісі, для прикладу, таким суглобом є ліктьовий. Більш складний суглоб, такий як плечовий, описується множиною простих. Наприклад якщо суглоб обертається відносно усіх трьох вісей, він буде описуватися множиною із трьох взаємного ортогональних простих шарнірів.

Відносний рух ІВБ має дві складові: кутовий рух та лінійне переміщення. З кожним ІВБ зв'язана власна СК, вісі якої які розташовані в певному положенні по відношенню до вісей вихідної СК (вихідна СК – СК, що зв'язана з кореневим, початковим, вузлом) Рис. 42. Мережа датчиків, в основному, використовується для отримання даних про рух ключових

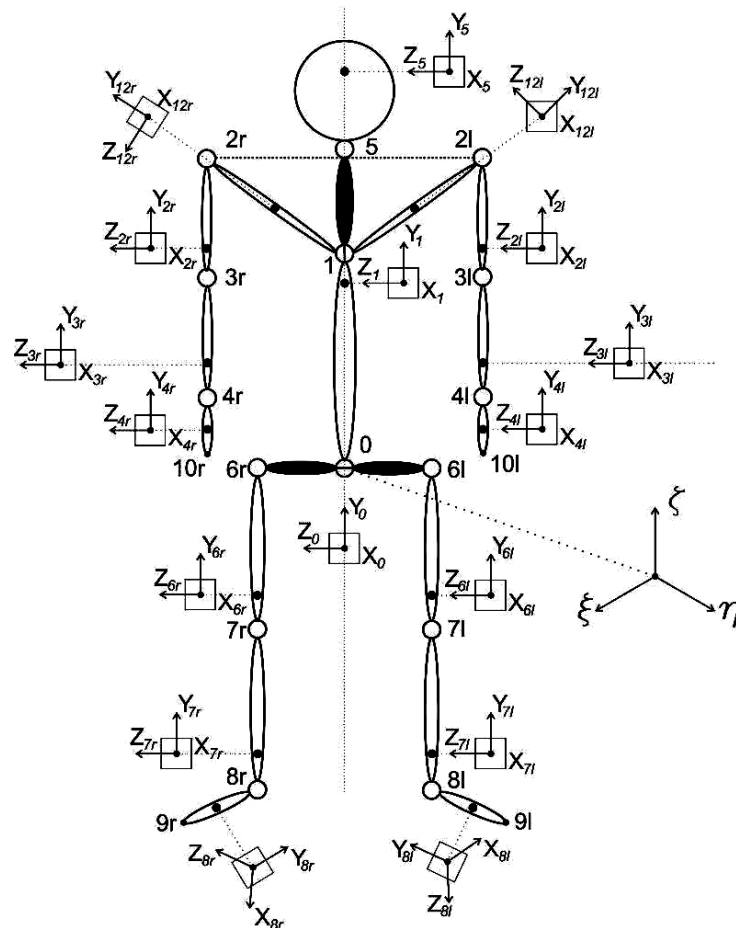


Рис. 42 Біомеханічна модель людського тіла з ука-
занням розташування ІВБ

суглобів людського тіла. Модель скелету людини має структуру суглобового ланцюга. Суглобові ланцюги являються кінематичними ланцюгами і складаються з серії послідовно з'єднаних твердих тіл, в яких перехід між двома твердими тілами називається суглобом. Побудова ієрархічної моделі суглобів людського тіла - це процедура визначення ключових суглобових точок людського тіла. Дані про рух цих точок можуть відображати рух людського тіла після їх опрацювання. Для того щоб отримати дані про рух 17 ключових суглобових точок, система має складатися з різної кількості ІВБ, що розміщуються у відповідних ключових точках (в залежності від складності обраної моделі).

Існує два методи опису взаємного розташування сусідніх сегментів, що утворюють шарнір (суглоб). Ці методи отримали назву параметри Денавіта-Хатенберга (DH) та модифіковані параметри Денавіта-Хатенберга (MDH). Різниця опису трансформацій полягає у виборі базового (кореневого) вузла який приймається за нульову систему координат, для DH кореневий вузол знаходиться ззовні, для MDH на тілі об'єкта. Відносно перетворення координат описується 4-вимірною гомогенною матрицею перетворень, котра враховує обидва можливі варіанти руху.

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (43)$$

де θ_i - відносний кут повороту між ортами x_{i-1} та x_i вздовж осі z_{i-1} ; d_i - відстань між центром СК $i-1$ та i ; a_i - відстань між точкою перетину осі z_{i-1} та x_i в напрямку i -ї СК; α_i - відносний кут між ортами z_{i-1} та z_i навколо осі x_i . Специфічні елементи перетворення D-H наведені в Таблиця 3.1.

Таблиця 3.1 Параметри D-H для опису руху руки людини

Така кінематична модель дозволяє обчислити відносне переміщення кожного з центрів систем координат. Знаючи параметри θ_i , d_i , a_i та α_i , загальне рівняння перетворення руху кінематичного ланцюга матиме вигляд:

З'єднання	θ	α	d	a
0	θ_1	90	0	0
1	θ_2	-90	0	0
2	θ_3	90	0	0
3	θ_4	0	d_3	0
4	θ_5	90	d_4	0
5	θ_6	-90	0	0
6	θ_7	-90	0	0

$$T_n^m = T_{m+1}^m \cdot T_{m+1}^m \cdot \dots \cdot T_n^m \quad (44)$$

3.2 Апаратна частина

Перед початком роботи необхідно чітко зрозуміти структуру та розробити концепцію апаратної частини. Для коректної роботи БКВ, вимірювальний блок повинен мати перш за все ІВБ. ІВБ включає в себе набір датчиків: 3-ох вісний гіроскоп ITG3200 компанії TDK (Invensense), 3-ох вісний акселерометр ADXL345 компанії Analog Devices та 3-ох вісний магнітометр HMC5883 виробника Honeywell.

Для проведення обчислень, вибірки даних, контролю та налагодження датчиків необхідно використовувати мікроконтролер або мікропроцесор. Мікропроцесор не є раціональним вибором, оскільки різко підвищується вартість розробки та зростає кількість компонентів. Більш прийнятним є використання мікроконтролера. Для передачі даних використовується бездротовий цифровий канал передачі даних. На стадії розробки, використання лише бездротового зв'язку є не завжди зручним. Для визначення калібровочних коефіцієнтів, оно-

влення ПЗ слід закладати можливість комунікації шляхом дротового з'єднання. Вимірювальний блок планується робити автономним, тому слід розглянути систему забезпечення живленням. Вся електронна частина корпусується задля запобіганню пошкоджень від зовнішніх факторів.

Ядром вимірювального блоку є обчислювальний модуль. На ринку присутня велика кількість пропозицій мікроконтролерів. Однак, вибір не популярної архітектури може призвести до різкого збільшення часу розробки програмного забезпечення. Провідними виробниками на ринку мікроконтролерів є компанія Atmel (нині Microchip). Саме тому архітектура AVR є найбільш популярною для розробників через наявний великий досвід роботи з даними пристроями. На момент розробки концепції найбільш прийнятним контролером, що відповідає поставленим вимогам є AVR ATmega 328p від компанії Microchip. Це 8-бітний RISC-контролер із частотою роботи до 20МГц, 32кб Flash-пам'яті, 1кб енергонезалежної пам'яті (EEPROM) та 2кб оперативної пам'яті. Контролер має апаратну реалізацію цифрових інтерфейсів I²C, UART, SPI. Живлення контролера 5В.

Програмування контролера виконано на мові програмування C++ в середовищі розробки програмного забезпечення AVRStudio. Оновлення програмного забезпечення відбувається через інтерфейс USB. Оскільки контролер не має апаратного USB інтерфейсу, використовується перетворювач FT232RL – конвертор протоколів UART-USB. Для коректного оновлення ПЗ, в мікроконтролері використовується загрузчик для платформи Arduino.

Датчики ІВБ датчики виготовлені за MEMS технологією та мають цифровий вихід I²C. Вони під'єднуються до контролера паралельно на шину даних I²C Рис. 45.

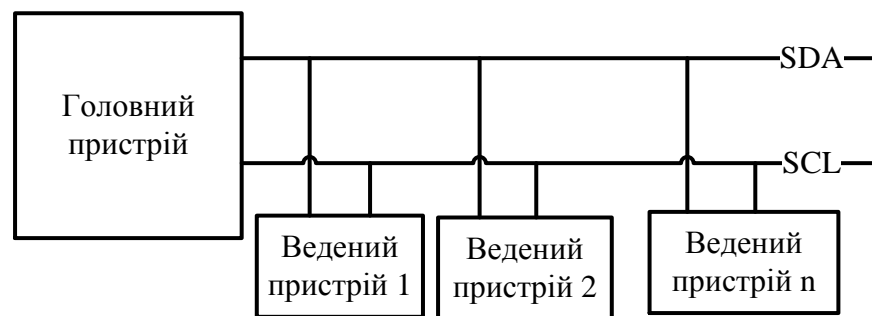


Рис. 45 Шина даних

Акселерометр ІВБ має три вісі чутливості. В акселерометрі може встановлюватись декілька меж вимірювання від $\pm 2g$ до $\pm 16g$, оснащений 10-бітним АЦП та (для діапазону вимірювання $\pm 16g$ розрядність АЦП може збільшитися до 13 біт). Чутливість сенсора для діапазону вимірювання $\pm 2g$ становить 256 LSB/g, шумова складова вихідного сигналу менше 1 LSB СКВ. Живлення сенсора від 2 до 3.6 В, розміри корпусу 3x5x1мм. [81].

Гіроскоп ITG3200 представлений збіркою трьох взаємно ортогональних MEMS ДКШ. Діапазон вимірювання становить $\pm 2000^\circ/\text{с}$ по всім трьом вісям чутливості. У датчик інтегровано 16-бітний АЦП, котрий дозволяє паралельно отримувати значення кутової швидкості по всім вісям чутливості. Чутливість датчика становить в середньому $14.375 \text{ LSB }^\circ/\text{с}$. ITG3200 має вбудований цифровий препроцесор, який дозволяє користувачу налагодити вбудований апаратний ФНЧ. У ньому присутня компенсація нестабільності дрейфу та температурної залежності калібровочних коефіцієнтів. Живлення сенсора виконується від джерела напругою від 2.1 до 3.6 В, розміри корпусу – 4x4x0.9мм.

Магнітометр HMC58831 представлений сукупністю трьох магніторезистивних датчики HMC118X із інтегрованою цифровою обробкою даних. Вбудований 12-бітний АЦП дозволяє визначити азимутальний кут із точністю до $1-2^\circ$. Діапазон вимірювання магнітометрів становить від одиниць мілі-гаус до 8 гаус. Розміри корпусу становлять 3x3x0.9, живлення датчика – в діапазоні від 2.1-3.6 В.

Бездротова передача даних здійснюється на основі прийомо-передатчика NRF24L01+. Радіоканал працює на частоті 2.4ГГц та здатен передавати дані на швидкості до 2 МБ/с. Струм споживання NRF24L01+ в режимі передатчика складає 11.3 мА при вихідній потужності 0дБ, та 13.5мА – у режимі приймача на швидкості 2МБ/с, в режимі очікування – 900 нА. Характерною рисою цих радіо модулів є висока завадостійкість каналу передачі даних. Система автоматично створює посилку при відправленні та обраховує контрольну суму під час прийому сигналу. У випадку якщо контрольна сума не збігається, приймач сповіщує передач, що посилка декодована не вірно і необхідно повторити транзакцію.

Мережа із вимірювальних блоків та приймача має структуру відповідно до системи MultiCeiver із 6 блоками на канал. Радіомодуль має цифровий інтерфейс SPI для обміну даних із мікроконтролером. Передача даних здійснюється з FIFO-буфера радіомодуля, у який вона завантажується після виконання основного алгоритму БКВ. Після завантаження даних радіо модуль автоматично збирає посилку, надсилає до приймача та переходить в режим приймача. Кожна посилка має свій унікальний ідентифікатор тому не може бути сплутана із посилкою від іншого вимірювального модуля. Приймач головного модуля приймає посилку та декодує її. Перевіривши контрольну суму, він надсилає передавачеві, що інформація передана успішно. У випадку успішної передачі, інформація записується у пам'ять приймача, звідки вже стає доступна користувачеві. Якщо посилка передана не вірно, приймач намагатиметься надіслати інформацію ще раз.

Створення БКВ потребує встановлення всіх трьох датчиків на одній платі взаємно перпендикулярно і таким чином, щоб вісі чутливості співпадали за напрямком. Необхідною вимогою до розміщення датчиків є зменшення відстані між датчиками та забезпечення неру-

хомого відносного положення під час руху об'єкта установки БКВ. З іншого боку, ставляться жорсткі вимоги до масо-габаритних параметрів та захищеності. Для вирішення поставлених задач необхідно створити спеціальну друковану плату.

Перед початком розробки плати створено принципову електричну схему за у САПР Altium Designer. Система має бути автономною, а тому в якості джерела живлення використовується Li-Po акумулятор високої ємності (900мАгод). Напруга акумулятора, в залежності від рівня заряду, варіюється від 4.2В до 3.6В. Беручи до уваги напруги живлення датчиків, необхідно використовувати два різні живлення: 5В для мікроконтролера та 3.3В для датчиків. Вибір стабілізатора живлення є дуже важливим етапом, адже через зміну рівня живлення, можуть змінюватись параметри датчиків. Обраний регулятор з фіксованою вихідною напругою LP2980AIM5-3.3 від Texas Instruments, який перекриває весь діапазон зміни напруги акумулятора. Точність встановлення напруги сягає $\pm 0.5\%$. Забезпечення стабільної роботи ATmega328p на частоті 20МГц можлива лише при номінальності напрузі живлення 5В. Для підвищення напруги живлення використовується підвищуючий регулятор постійного струму (DC-DC boost converter) NCP1402 компанії On Semiconductor. Його напруга початку роботи починається від 0.8В, точність встановлення 2,5% навантаження до 200мА. ККД такої схеми 85%.

Зарядка акумулятора проводиться шляхом під'єднання ззовні USB кабел. Li-Po акумулятори чутливі до перезарядки за глибокого розряду. За певних обставин, перезаряджений або сильно розряджений акумулятор може зруйнуватися та спричинити займання. Для запобігання таких випадків, у принциповій схемі передбачено схему моніторингу заряду акумулятора.

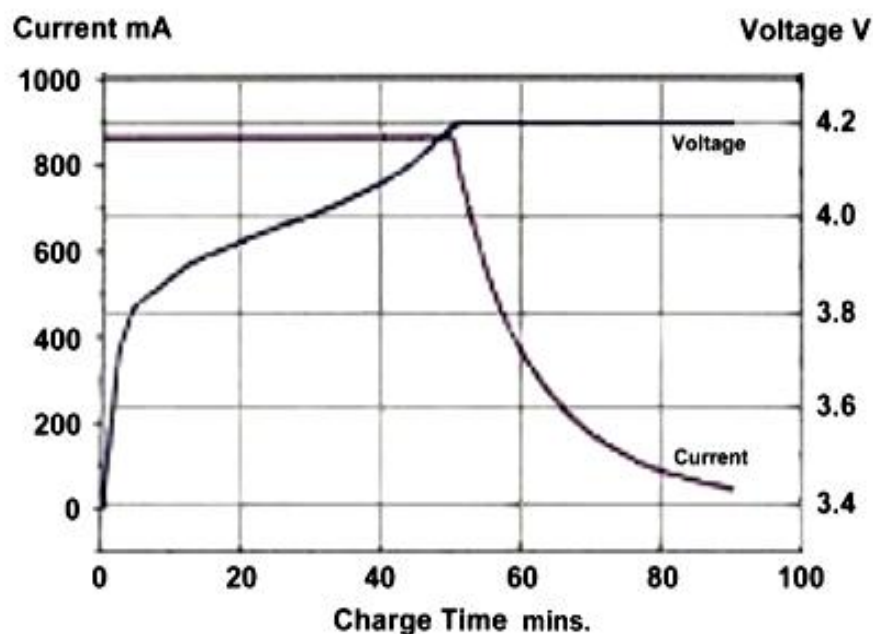


Рис. 46 Крива заряду акумулятора

лятора. Зарядом акумулятора керує мікросхема MCP73831T. При критично низьких рівнях зарядку, мікросхема стабілізує струм, при не значному розряді – напругу (Рис. 46). Система фіксації рівня заряду і відключення схеми (у разі сильного розряду) побудована на компараторі TL331. У випадку критичного розряду, компаратор вимикає живлення всієї схеми та відновлює у випадку повернення рівня заряду до робочого. Розрахунковий час повного заряду акумулятора складає до 2х годин.

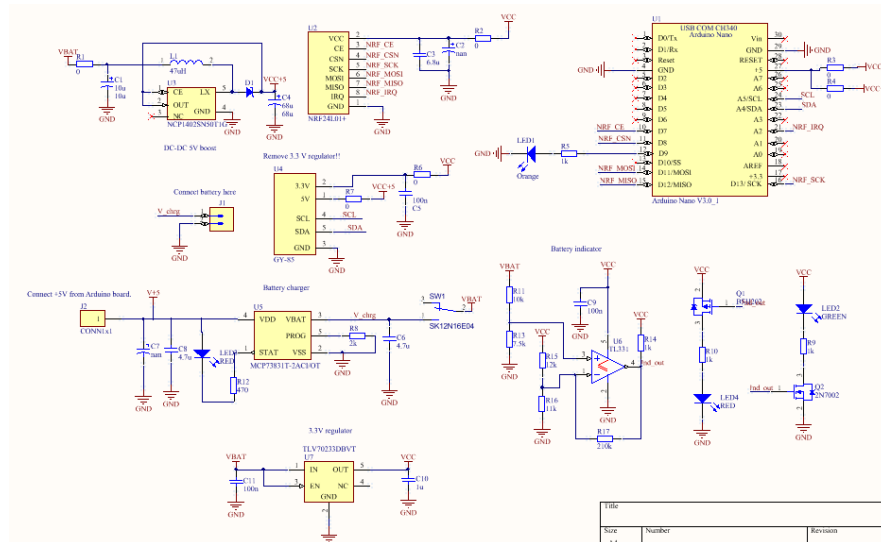


Рис. 47 Електрична принципова схема

Розроблена електрична схема БКВ, що включає всі вище описані блоки (показана на Рис. 47). Трасування проводиться за попередньо складеною схемою. Для виконання габаритних вимог, необхідно використовувати що найменше два сигнальні шари на друкованій платі. В якості матеріалу для виготовлення друкованої плати обрано текстоліт FR-4 та паяльну маску синього кольору для запобігання корозії сигнальних ліній. Схема трасування та реальна плата на Рис. 48.

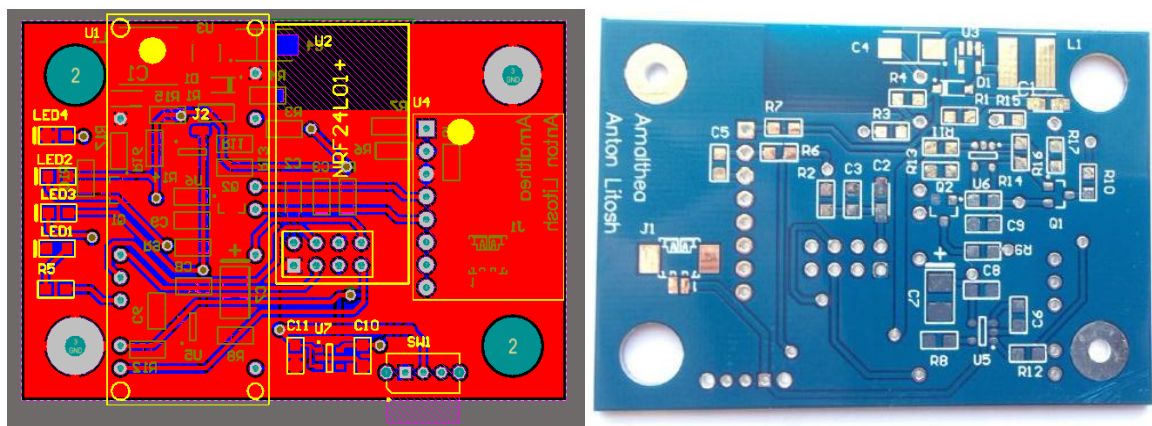


Рис. 48 Друкована плата вимірювального блоку

Задля зменшення розмірів та здешевлення виробництва, використовуються компоненти поверхневого монтажу SMD розміром 0805. Зібрана друкована плата поміщається в спеціальний захисний корпус, виконаний із пластику. Для кріплення частин корпусу використовуються пластикові гвинти для запобігання намагнічування в процесі роботи. Ви готового приладу представлено на Рис. 49.



Рис. 49 Вид готового приладу

3.3 Калібровка чутливих елементів ІСЗРЛ

ІВБ БКВ складається з акселерометрів, гіроскопів та магнітометрів, кожний з яких має свої індивідуальні характеристики у вигляді масштабного коефіцієнта, зсуву нуля, коефіцієнтів перехресних зв'язків і ряду інших параметрів. Крім того, при установці чутливих елементів у ІВБ в силу інструментальних похибок виготовлення виникають розбіжності осей чутливості елементів з базовими осями блоку. Для визначення вищезазначених параметрів математичних моделей вимірювачів з метою наступного їхнього врахування виконують процедуру калібрування.

Калібрування – це процедура визначення характеристик інерціальних чутливих елементів (ЧЕ) у результаті спеціально організованого процесу вимірювань вихідних сигналів і їхньої наступної обробки. Для поставленої задачі калібрування інерціальних датчиків з необхідною точністю підходять в основному методи калібрування в гравітаційному полі Землі.

3.3.1 Калібровка акселерометрів

Задачею калібрування акселерометра [82] є визначення параметрів моделі його вихідного сигналу з метою їх урахування при обчисленні дійсного значення уявного прискорення a_z .

Калібрування низькочастотних лінійних акселерометрів виконується на спеціальних стендах шляхом завдання тестових вхідних впливів (прискорень) і вимірюванням вихідних сигналів акселерометрів. Розроблена велика кількість методик визначення параметрів акселерометрів, враховуючи велику кількість різновидів устаткування, що може бути використане для калібрування. Розглянемо одну з найбільш популярних методик – методику з формуванням пар рівнянь для визначення кожного параметру.

Калібрування акселерометрів в діапазоні $\pm 1g$ здійснюється шляхом завдання відомих положень акселерометра відносно вектора прискорення сили тяжіння g . Для високоточного завдання положення акселерометра відносно вектора сили тяжіння g , частіше за все використовують прецизійні оптичні ділильні головки (ОДГ), що забезпечують точність повороту акселерометра на рівні приблизно 10 кутових секунд. Для зменшення впливу від зовнішніх коливань, добових коливань споруд та інших механічних взаємодій, ОДГ встановлюють на спеціальний фундамент, що є розв'язаним відносно споруди, в якій знаходиться калібрувальна ділянка.



Рис. 50 Ділильна головка ОДГ-10 із вставленою БКВ

льна ділянка.

Вимірювальний модуль, або інший прилад, в якому встановлено акселерометр, повинен мати щонайменше дві перпендикулярні базові поверхні, які і формують базові осі приладу. Вимірювальний модуль встановлюється однією зі своїх баз на площадку ОДГ і притискається другою базою до однієї з бокових баз площадки. Таким чином забезпечується паралельність однієї з осей вимірювального модуля відносно осі обертання ОДГ.

Для здійснення калібрування вісь обертання ОДГ і базова платформа виставляються в горизонті також з точністю до 10 кутових секунд з використанням прецизійних рідинних рівнів. Це дозволяє з високою точністю зорієнтувати базові осі вимірювального модуля, а значить, і акселерометра відносно вектора прискорення сили тяжіння (Рис. 50).

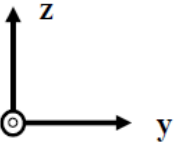
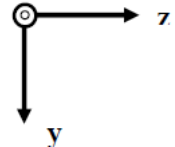
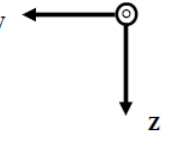
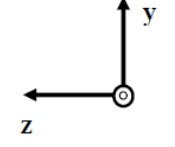
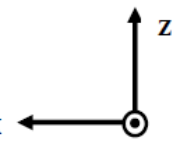
Розглянемо один з найпоширеніших варіантів задання положення акселерометра при калібруванні на ОДГ, схему якого наведено в Таблиця 3.2. З таблиці видно, що для повного калібрування акселерометра, його необхідно обертати навколо двох осей. Справа у тому, що для визначення параметрів моделі вихідних сигналів акселерометрів [4]:

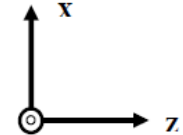
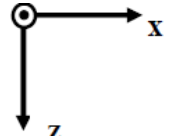
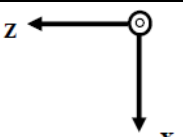
$$\begin{bmatrix} U_{ax} \\ U_{ay} \\ U_{az} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_y & k_{yz} \\ k_z & k_{zx} & k_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{ax0} \\ U_{ay0} \\ U_{az0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{ax} \\ n_{ay} \\ n_{az} \end{bmatrix} \quad (45)$$

необхідно задавати відомі положення a_x, a_y, a_z по кожній з трьох осей X, Y, Z, а це означає, що кожна з трьох осей повинна змінювати своє положення відносно вектора g . При повороті акселерометра на ОДГ навколо однієї осі, ця вісь не змінює своє положення відносно вектора g . Тому акселерометр переставляють на ОДГ, змінюючи вісь обертання. В Таблиця 3.2 також наведено значення проєкцій уявного прискорення (45) на осі акселерометра для кожного положення з урахуванням того, що вектор g направлено вертикально вниз.

Підставивши значення проєкцій уявного прискорення a_x, a_y, a_z з у вираз (45), отримаємо значення вихідного сигналу акселерометра U_{az} для кожного з положень, які також наведені в Таблиця 3.2.

Таблиця 3.2 Положення осей блока акселерометрів при калібруванні на ОДГ і відповідні значення прискорень і вихідних сигналів акселерометрів

№	Положення осей блока акселерометрів	Кут за шкалою ОДГ	Проекції g	Проекції уявного прискорення	Вихідні сигнали акселерометрів
Поворот навколо осі X					
1		0°	$g_x = 0$ $g_y = 0$ $g_z = -g$	$a_x = 0$ $a_y = 0$ $a_z = g$	$U_{ax1} = k_{xz}g + U_{ax0}$ $U_{ay1} = k_{yz}g + U_{ay0}$ $U_{az1} = k_zg + U_{az0}$
2		90°	$g_x = 0$ $g_y = g$ $g_z = 0$	$a_x = 0$ $a_y = -g$ $a_z = 0$	$U_{ax2} = -k_{xy}g + U_{ax0}$ $U_{ay2} = -k_yg + U_{ay0}$ $U_{az2} = -k_{zy}g + U_{az0}$
3		180°	$g_x = 0$ $g_y = 0$ $g_z = g$	$a_x = 0$ $a_y = 0$ $a_z = -g$	$U_{ax3} = -k_{xz}g + U_{ax0}$ $U_{ay3} = -k_{yz}g + U_{ay0}$ $U_{az3} = -k_zg + U_{az0}$
4		270°	$g_x = 0$ $g_y = -g$ $g_z = 0$	$a_x = 0$ $a_y = g$ $a_z = 0$	$U_{ax4} = k_{xy}g + U_{ax0}$ $U_{ay4} = k_yg + U_{ay0}$ $U_{az4} = k_{zy}g + U_{az0}$
Поворот навколо осі Y					
5		0°	$g_x = 0$ $g_y = 0$ $g_z = -g$	$a_x = 0$ $a_y = 0$ $a_z = g$	$U_{ax5} = k_{xz}g + U_{ax0}$ $U_{ay5} = k_{yz}g + U_{ay0}$ $U_{az5} = k_zg + U_{az0}$

6		90°	$g_x = -g$ $g_y = 0$ $g_z = 0$	$a_x = g$ $a_y = 0$ $a_z = 0$	$U_{ax6} = k_x g + U_{ax0}$ $U_{ay6} = k_{yx} g + U_{ay0}$ $U_{az6} = k_{zx} g + U_{az0}$
7		180°	$g_x = 0$ $g_y = 0$ $g_z = g$	$a_x = 0$ $a_y = 0$ $a_z = -g$	$U_{ax7} = -k_{xz} g + U_{ax0}$ $U_{ay7} = -k_{yz} g + U_{ay0}$ $U_{az7} = -k_z g + U_{az0}$
8		270°	$g_x = g$ $g_y = 0$ $g_z = 0$	$a_x = -g$ $a_y = 0$ $a_z = 0$	$U_{ax8} = -k_x g + U_{ax0}$ $U_{ay8} = -k_{yx} g + U_{ay0}$ $U_{az8} = -k_{zx} g + U_{az0}$

Для суттєвого зменшення впливу шуму вимірювань p_{az} , вихідний сигнал акселерометра осереднюється протягом певного часу вимірювання (зазвичай 30...60 с), тому вирази в Таблиця 3.2. шум вимірювань p_{az} з виразу (45) не враховують.

У відповідності до виразів у останньому стовпці Таблиця 3.2, визначаємо шукані параметри моделі вихідного сигналу акселерометра [82]:

$$\begin{aligned}
 k_x &= (U_{ax6} - U_{ax8}) / 2g & k_{xy} &= (U_{ax4} - U_{ax2}) / 2g & k_{xz} &= (U_{ax1} - U_{ax3} + U_{ax5} - U_{ax7}) / 4g \\
 k_{yx} &= (U_{ay6} - U_{ay8}) / 2g & k_y &= (U_{ay4} - U_{ay2}) / 2g & k_{yz} &= (U_{ay1} - U_{ay3} + U_{ay5} - U_{ay7}) / 4g \\
 k_{zx} &= (U_{az6} - U_{az8}) / 2g & k_{zy} &= (U_{az4} - U_{az2}) / 2g & k_z &= (U_{az1} - U_{az3} + U_{az5} - U_{az7}) / 4g \\
 U_{ax0} &= \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 U_{axi} & U_{ay0} &= \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 U_{ayi} & U_{az0} &= \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 U_{azi}
 \end{aligned} \quad (46)$$

Зрозуміло, що для обчислення параметрів акселерометрів за формулами (46) необхідно знати модуль вектора прискорення сили тяжіння в місці проведення випробувань. Після проведення калібрування можливо визначити істинні проекції уявного прискорення a_x, a_y, a_z .

Визначимо значення вектора $\begin{bmatrix} a_x & a_y & a_z \end{bmatrix}^T$ із рівняння (45) без урахування шуму

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} \end{bmatrix} \cdot \left(\begin{bmatrix} U_{ax} \\ U_{ay} \\ U_{az} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} U_{ax0} \\ U_{ay0} \\ U_{az0} \end{bmatrix} \right) \quad (47)$$

Де

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_y & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_z \end{bmatrix}^{-1} \quad (48)$$

Приклад отриманих калібровочних коефіцієнтів для одного з ІВБ ІСЗРЛ у Таблиця 3.3.

Таблиця 3.3 Результати калібрування блока акселерометрів

Серійний № БКВ	Акселерометр	Параметри калібрування			
ID1	Акс. X	$k_x = 26.3228$	$k_{xy} = -0.6472$	$k_{xz} = -0.6169$	$U_{ax} = 12.8472$
	Акс. Y	$k_{yx} = 0.5728$	$k_y = 26.5686$	$k_{yz} = 0.2917$	$U_{ay} = 13.1197$
	Акс. Z	$k_{zx} = 0.5242$	$k_{zy} = -0.2961$	$k_z = 25.9735$	$U_{az} = -0.8732$

$$Q = \begin{bmatrix} 0.0380 & 0.0009 & 0.0009 \\ -0.0008 & 0.0376 & -0.0004 \\ -0.0008 & 0.0004 & 0.0385 \end{bmatrix} \quad (49)$$

Перевірка точності визначення коефіцієнтів полягає у визначенні відхилення ідеально заданого кута та оціненого за допомогою датчиків. Для цього ІВБ встановлюється на ОДГ та повертається на певні кути відносно вертикалі. Порівнюються значення, виміряні за допомогою шкали ноніуса на ОДГ та розрахованих за формулою (40). Приведені графіки точності визначення кутів крену і тангажу показують, що похибка не перевищує 0.4° , що відповідає 0.05 м/с^2 .

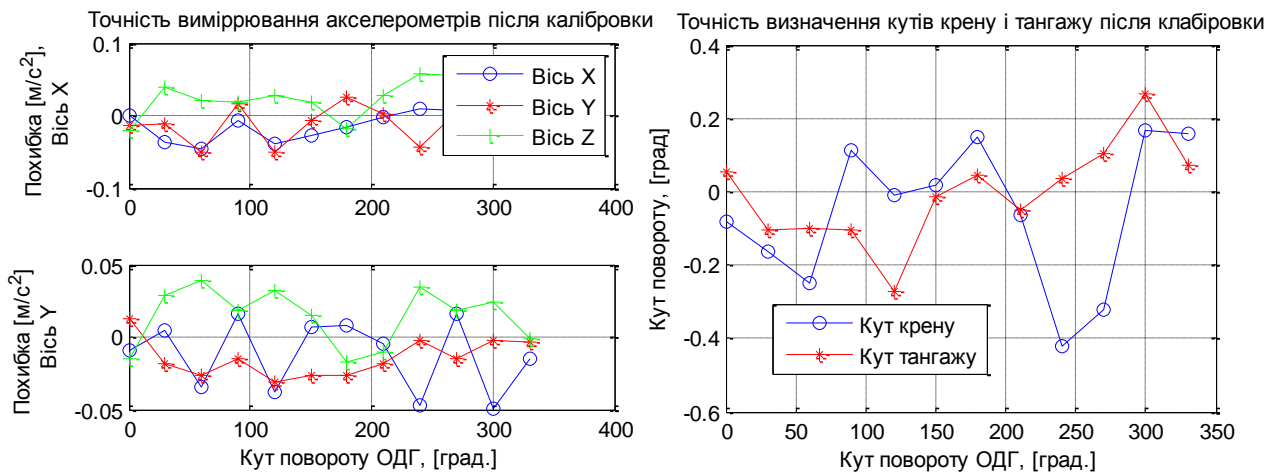


Рис. 51 Точність проведення калібрування

3.3.2 Калібровка гіроскопів

Кожен окремий реальний екземпляр ДКШ має свої індивідуальні особливості у вигляді масштабного коефіцієнта, зміщення нуля, перехресних зв'язків та інших параметрів. Тобто більш реальна модель вихідного сигналу ДКШ має вигляд:

$$\begin{bmatrix} U_{\omega x} \\ U_{\omega y} \\ U_{\omega z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{\omega x 0} \\ U_{\omega y 0} \\ U_{\omega z 0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{\omega x} \\ n_{\omega y} \\ n_{\omega z} \end{bmatrix} \quad (50)$$

Задача полягає у визначенні коефіцієнти r_{ij} матриці масштабних коефіцієнтів і перехресних зв'язків в моделі (50) шляхом завдання ряду значень кутової швидкості. Для цього ІВМ встановлюють на спеціальний поворотний стіл, вісь обертання якого повинна бути виставлена вертикально. Точність завдання і стабілізації кутової швидкості обертання столу для калібрування гіроскопів повинна бути не гірша ніж точність гіроскопів, що калібруються.

При калібруванні на обертальному столі задається кілька значень N кутової швидкості обертання в необхідному діапазоні вимірювань гіроскопів (ДКШ) для більш точної побудови статичної характеристики. Наприклад, для робочого діапазону ДКШ $\pm 300^\circ/\text{с}$ зручно задати $N=7$ значень кутової швидкості з кроком $20^\circ/\text{с}$ від $-100^\circ/\text{с}$ до $+100^\circ/\text{с}$. У будь-якому випадку має бути задано $N \geq 2$ кутових швидкостей по кожній осі. Зважаючи на доступне обладнання для калібровки (поворотний стіл МПУ-60), обрано процедуру спрощеної калібровки, тобто визначення лише масштабних коефіцієнтів прямого каналу та зміщення нулів. В цьому випадку модель (50) вихідного сигналу ДКШ спрощується

$$\begin{bmatrix} U_{\omega x} \\ U_{\omega y} \\ U_{\omega z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{\omega x 0} \\ U_{\omega y 0} \\ U_{\omega z 0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{\omega x} \\ n_{\omega y} \\ n_{\omega z} \end{bmatrix} \quad (51)$$

Коефіцієнти моделі (51) визначаються за формулами

$$k_z = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_{zi} \cdot \sum_{i=1}^N U_{\omega zi} - N \cdot \sum_{i=1}^N (\omega_{zi} U_{\omega zi})}{\left(\sum_{i=1}^N \omega_{zi} \right)^2 - N \cdot \sum_{i=1}^N \omega_{zi}^2}; \quad U_{\omega z 0 \Sigma} = \frac{1}{8} \left(\sum_{i=1}^N U_{\omega zi} - k_z \sum_{i=1}^N \omega_{zi} \right) \quad (52)$$

Таблиця 3.4 Результати вимірювань вихідного сигналу ДКШ на обертальному стенді

Задане значення кутової швидкості ω_{ni} , град/с	Вихідний сигнал ДКШ, U_{omi}			Задане значення кутової швидкості ω_{ni} , град/с	Вихідний сигнал ДКШ, U_{omi}		
	$U_{\omega xi}$	$U_{\omega yi}$	$U_{\omega zi}$		$U_{\omega xi}$	$U_{\omega yi}$	$U_{\omega zi}$
0	83	-13	8	0	66.79	-10.08	11.89
20	373	276	293	-20	-207	-303	-277
40	667	569	582	-40	-501	-596	-566
60	963	865	873	-60	-797	-893	-857
80	1255	1153	1159	-80	-1090	-1184	-1143
100	1552	1452	1452	-100	-1387	-1481	-1437

Отримані параметри математичної моделі тривісного блоку ДКШ приведено в Таблиця 3.5

Таблиця 3.5 Параметри математичної моделі сигналу ДКШ

Вісь ДКШ	Результати калібрування	
	k	U_{ω}
X	14.6705	82.7314
Y	14.6446	-13.9085
Z	14.4160	8.0001

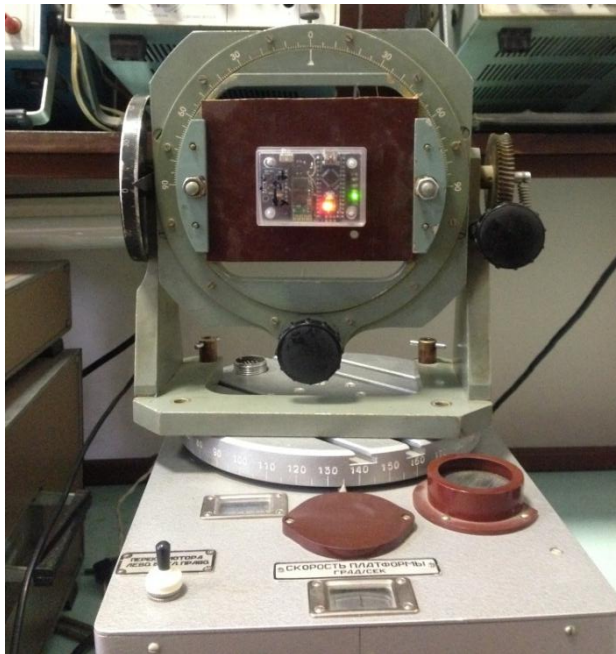


Рис. 52 ІВБ на поворотному столі

Перевірка калібрування проводиться наступним чином. Вже відкалібрований ДКШ ставиться на поворотний стіл та виставляється певна кутова швидкість. Проводиться вибірка даних та усереднення результатів. Різниця між заданою кутовою швидкістю та виміряною відображає точність приладу. Установка для проведення калібрування та перевірки зображено на Рис. 52

Результати проведення перевірки зображено на Рис. 53. На графіку видно, що похибка не перевищує $0.5^\circ/\text{с}$ по прямому каналу вимірювання. Перехресні

зв'язки можуть виникати через наявний ексцентриситет апаратури та не повною моделлю вихідних сигналів.

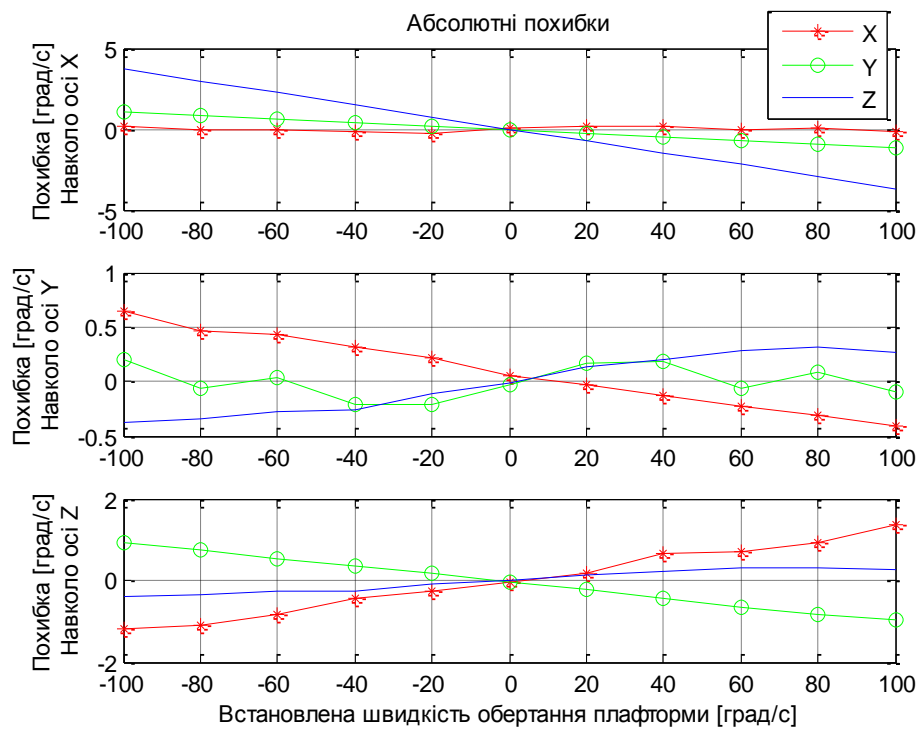


Рис. 53 Результат калібровки ДКШ

3.3.3 Калібровка магнітометрів

Особливу увагу слід приділити калібровці магнітометрів. Через змінюваність МПЗ в залежності від місця вимірювань треба брати до уваги властивості магнітометрів для коректного визначення азимутального положення. Зважаючи на особливість конструкції вимірювального блоку, існує можливість проводити місцеву калібровку датчиків, враховуючи значення МПЗ у місці проведення дослідів. Вихідний сигнал магнітометрів описується рівнянням:

$$\begin{bmatrix} U_{mx} \\ U_{my} \\ U_{mz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_y & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{mx0} \\ U_{my0} \\ U_{mz0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{mx} \\ n_{my} \\ n_{mz} \end{bmatrix} \quad (53)$$

Де U_{mi} - вихідні сигнали магнітометра (LSB); H_i - проєкції МПЗ на вісі чутливості ІВБ; U_{mi0} - зміщення нулів магнітометра.

Загалом, калібровку магнітометра можна розділити на 2 етапи: заводська (використовуючи кільця Гельмгольца), місцева (приведення еліпсоїда в сферу), яка запропонована D. Gebre-Egziabher та ін.. [83]).

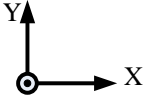
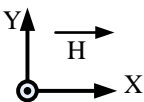
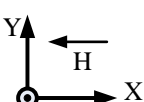
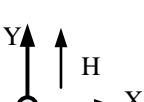
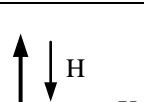
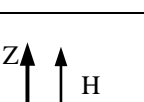
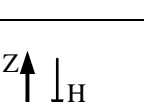
Перша калібровка проводиться в спеціально створених лабораторних умовах. На цьому етапі за допомогою кілець Гельмгольца (Рис. 54) створюється спе-



Рис. 54 Кільця Гельмгольца

ціальне магнітне поле, компенсуючи вплив МПЗ, в котре поміщають ІВБ. Принцип проведення дослідів схожий до калібровки акселерометрів. Положення вісей магнітометра відносно заданого магнітного поля приведено в Таблиця 3.6.

Таблиця 3.6 Положення вісей ІВБ відносно магнітного поля кілець Гельмгольца

№	Положення осей блока акселерометрів	Проекції МПЗ	Вихідні сигнали акселерометрів
0		$m_x = 0$ $m_y = 0$ $m_z = 0$	$U_{mx1} = U_{mx0}$ $U_{my1} = U_{my0}$ $U_{mz1} = U_{mz0}$
1		$m_x = H$ $m_y = 0$ $m_z = 0$	$U_{mx1} = k_x H + U_{mx0}$ $U_{my1} = k_{yx} H + U_{my0}$ $U_{mz1} = k_{zx} H + U_{mz0}$
2		$m_x = -H$ $m_y = 0$ $m_z = 0$	$U_{mx2} = -k_x H + U_{mx0}$ $U_{my2} = -k_{yx} H + U_{my0}$ $U_{mz2} = -k_{zx} H + U_{mz0}$
3		$m_x = 0$ $m_y = H$ $m_z = 0$	$U_{mx3} = k_{xy} H + U_{mx0}$ $U_{my3} = k_y H + U_{my0}$ $U_{mz3} = k_{zy} H + U_{mz0}$
4		$m_x = 0$ $m_y = -H$ $m_z = 0$	$U_{mx4} = -k_{xy} H + U_{mx0}$ $U_{my4} = -k_y H + U_{my0}$ $U_{mz4} = -k_{zy} H + U_{mz0}$
5		$m_x = 0$ $m_y = 0$ $m_z = H$	$U_{mx5} = k_{xz} H + U_{mx0}$ $U_{my5} = k_{yz} H + U_{my0}$ $U_{mz5} = k_z H + U_{mz0}$
6		$m_x = 0$ $m_y = 0$ $m_z = -H$	$U_{mx5} = -k_{xz} H + U_{mx0}$ $U_{my5} = -k_{yz} H + U_{my0}$ $U_{mz5} = -k_z H + U_{mz0}$

Параметри вихідного сигналу (53) отримуються за допомогою пакетного методу найменших квадратів.

$$\begin{bmatrix} k_x & k_{xy} & k_{xz} & U_{mx0} \\ k_{yx} & k_y & k_{yz} & U_{my0} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_z & U_{mz0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{mx1} & U_{my1} & U_{mz1} & 1 \\ U_{mx2} & U_{my2} & U_{mz2} & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ U_{mxN} & U_{myN} & U_{mzN} & 1 \end{bmatrix} \cdot A(A^T A)^{-1} \quad (54)$$

Де матриця A представляє відповідні задані величини магнітного поля H .

$$A = \begin{bmatrix} H_{x1} & H_{y1} & H_{z1} \\ H_{x2} & H_{y2} & H_{z2} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ H_{xN} & H_{yN} & H_{zN} \end{bmatrix} \quad (55)$$

У результаті проведення калібровки отримані такі параметри вихідного сигналу

№ БКВ	Магніт ометр	Параметри калібрування			
ID1	Маг. X	$k_x = 0.0092$	$k_{xy} = -0.0001$	$k_{xz} = 1.64 \cdot 10^{-5}$	$U_{mx0} = 92.43$
	Маг. Y	$k_{yx} = -7.5799 \cdot 10^{-5}$	$k_y = 0.0088$	$k_{yz} = 12.402 \cdot 10^{-5}$	$U_{my0} = -162.29$
	Маг. Z	$k_{zx} = -9.07 \cdot 10^{-5}$	$k_{zy} = -18.916 \cdot 10^{-5}$	$k_z = 0.0085$	$U_{mz0} = 29.9$

Інверсна матриця Q

$$Q = \begin{bmatrix} 108.57 & 1.4363 & -0.23258 \\ 0.9229 & 114.15 & -1.6756 \\ 1.1848 & 2.5684 & 118.19 \end{bmatrix} \quad (56)$$

Отримана похибка вимірювання (Рис. 55) магнітного поля склала <500 нТл, що становить, приблизно 1% від напруженості МПЗ (приблизно 50000 нТл).

Однак в точці проведення дослідів параметри МПЗ можуть відхилятися від закладених в алгоритм. Для їх врахування слід проводити місцеву калібровку за процедурою, описаною у роботі [85]. Метод полягає у фіксації показів магнітометрів при обертанні ІВБ навколо

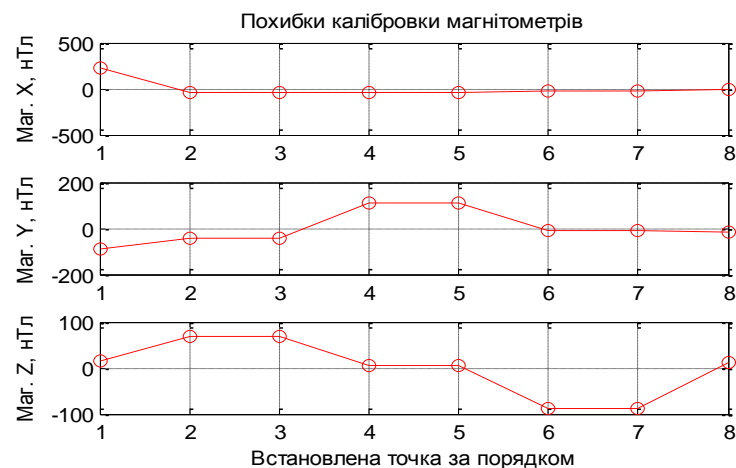


Рис. 55 Перевірка отриманих параметрів вихідного сигналу магнітометра

власних вісей у випадковому порядку, описуючи сферу. В ідеальному випадку, отримані дані повинні описуватися рівнянням сфери.

У випадку наявності впливу магніто-твердого або магнітом'якого заліза, дані опишуть еліпсоїд. Приведення еліпсоїда до сфери із центром в точці 0,0,0 дає змогу оцінити відхилення МПЗ від ідеального і визначити коефіцієнти компенсації цих спотворень [84].

3.4 Програмна частина

Структура програми для мікроконтролера включає в себе реалізацію вище описаних алгоритмів та підключення протоколів обміну між вимірювальним блоком, мікроконтролером, зовнішніми приладами

Обмін даними між ІВБ та мікроконтролером в середині вимірювального модулю здійснюється за допомогою протоколу I2C. Тому для того, щоб розпочати комунікацію із датчиками була створена бібліотека протоколу обміну. Функціонал цих бібліотек дозволяє користувачеві отримати доступ до основних регістрів та можливостей датчиків. Вони представлені файлами ADXL345.H, HMC5300.H, ITG3200.H.

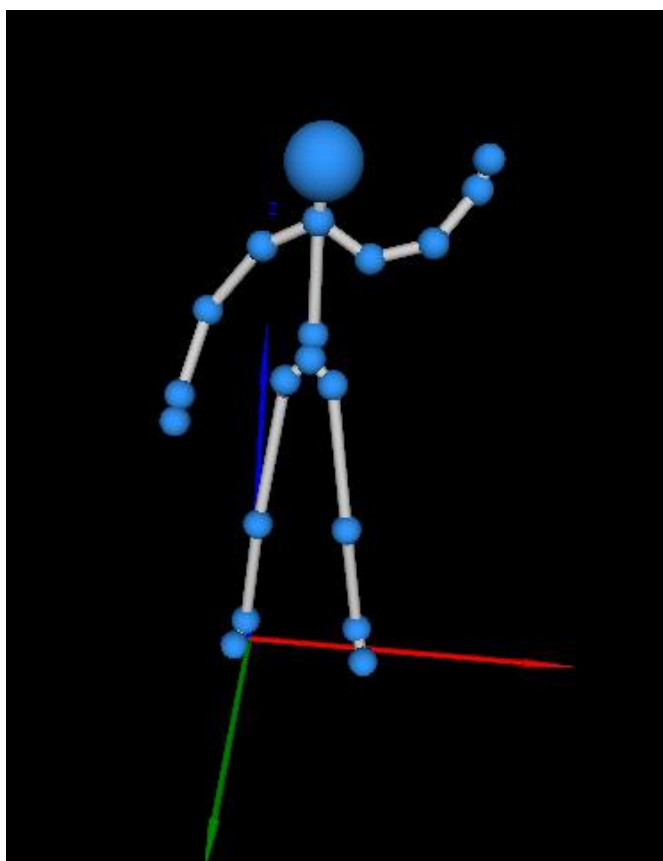


Рис. 56 Відображення скелету людини в середовищі LabVIEW

Стандартних засобів для роботи з матрицями та кватерніонами у середовищі Arduino не існує. Для спрощення розробки системи було створено набір бібліотек. Використання бібліотек спрощує написання коду, підвищує читабельність та зменшує шанс допустити помилку. MATRIX.H - це бібліотека, яка дає змогу кінцевому користувачеві виконувати всі операції над матрицями. Відповідно QUTERNION.H – бібліотека для роботи із кватерніонною математикою. Сам фільтр описаний у файлі Amalthea_AHRS.H.

Комунікація між користувачем і приймачем по UART та є напівдуплексною. Тому дані з приладів надходять тільки у відповідь на запит. У системі є можливість ввімкнення або відключення радіо модуля. Даними, що надсилає прилад можуть бути кватерніон, кути Ейлера, або кути орієнтації тіла.

Для відображення орієнтації тіла людини у просторі використовується середовище LabView. З'єднання між блоками БКВ та програмою забезпечується за допомогою Toolkit VISA.

Візуалізація побудована на основі бібліотека Kinesthesia від компанії Microsoft (Рис. 56). Програма ділиться на 3 етапи. На першому етапі проходить ініціалізація моделі та приймача. Далі в циклі проводиться опитування приймача та збирається актуальна інформація. Після обробки даних, система відображає актуальну інформацію на екрані. Блок-діаграма приведена на Рис. 57.

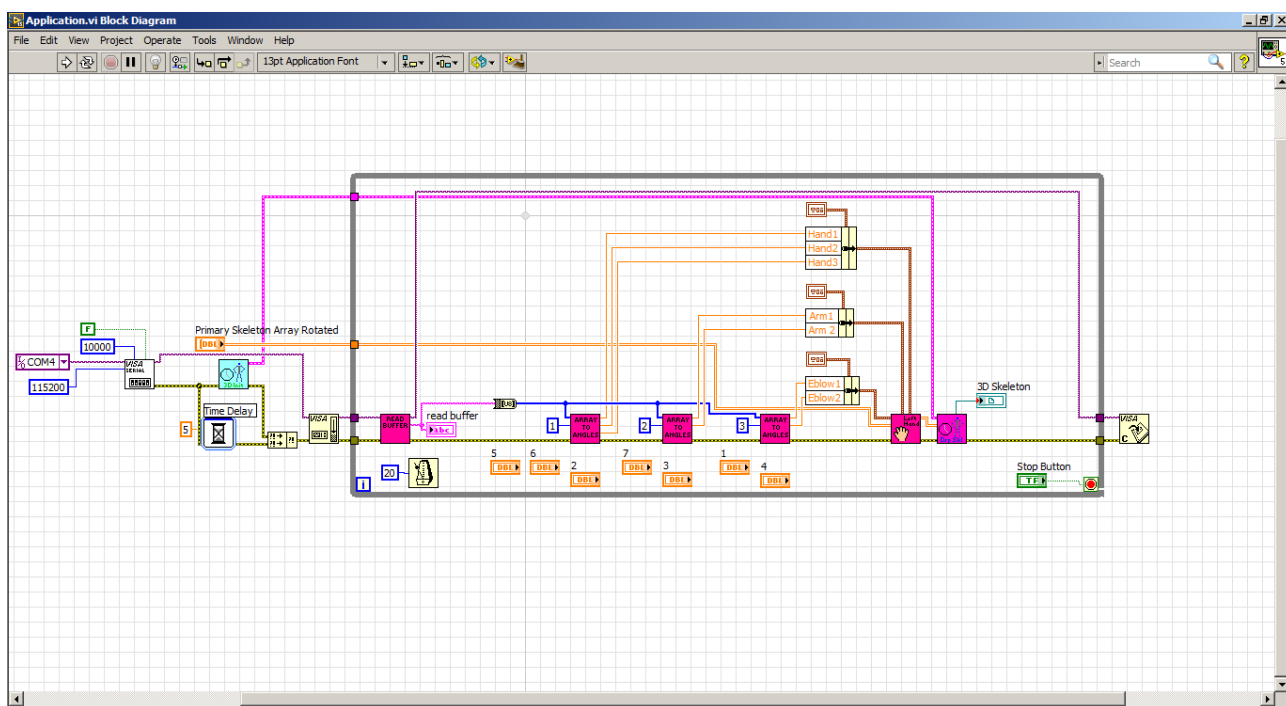


Рис. 57 Блок-діаграма програми відображення даних в середовищі LabVIEW

3.5 Висновки

У даному розділі описано особливості побудови створеної інерціальної системи захоплення руху людини. Однією із головних задач є створення БКВ для функціонування системи. БКВ включає в себе інерціальні датчики та обчислювальний модуль. Для досягнення поставлених вимог щодо точності визначення орієнтації слід правильно обрати елементну базу. Під час вибору датчиків слід зважати на декілька факторів: точність, ціна та габарити. Точні датчики можуть значно підвищити точність оцінки орієнтації, але з іншого боку різко зростає вартість системи. Ще одна особливість розробленої ІСЗРЛ – високі вимоги до масогабаритних показників. Чим більша маса приладу, тим більш незручною у використанні буде система.

У розділі приділено увагу автономності приладу. БКВ, розробленої ІСЗРЛ, мають вбудовану батарею та бездротовий передавач. Радіус дії системи – до 50м, час автономної роботи більше 20 годин. Розміщення всіх елементів БКВ проводиться на спеціально розробленій друкованій платі.

У розділі проведено калібровку датчиків ІВБ. Калібрування акселерометрів виконувалося в гравітаційному полі Землі на поворотному столі ОДГ-10. Точність визначення горизонту сягає $\pm 0.2^\circ$. Гіроскопи калібрувалися на поворотному столі МПУ-60. Визначено параметри вихідного сигналу по прямому каналу. Через недосконалість тестового обладнання неможливо визначити із бажаною точністю всі параметри, тому калібровка проводилася лише по прямим каналах вимірювання. Точність оцінки кутової швидкості після калібровки – $\pm 0.5^\circ/\text{сек}$. Для оцінки параметрів магнітометрів використовувалась заводська калібровка в кільцях Гельмгольца. У роботі також розглянуто методику проведення місцевої калібровки шляхом приведення еліпса вимірювань магнітометрів в сферу. Ці операції здатні підвищити точність системи та пристосовуваність до навколишнього середовища.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

4.1 Опис ідеї проекту

Інерціальна система захоплення руху людини призначення для збору кінетичної інформації біомеханічних параметрів тіла. Вона дає можливість повністю оцифровати рух людини як в статичі, так і в динаміці. По записаним даним існує можливість відтворити тривимірну модель тіла. Загалом, система складається із 21 ІВБ із цифровим процесором на борту та каналом бездротового зв'язку, що утворює окремий незалежний вимірювальний блок. Ці блоки кріпляться у відповідних точках на тілі людини у відповідності до обраної моделі тіла людини. Записані дані за допомогою бездротового давача передають інформацію на персональний комп'ютер де користувач може відобразити дані.

Такі системи в основному застосовуються в кінематографі для відтворення реалістичної графіки або під час реабілітації спортсменів. Окрім реабілітації дослідників цікавить також заходи щодо профілактики травм та їх природу.

В межах підпункту послідовно проаналізовано та подано у вигляді таблиць: зміст ідеї; можливі напрямки застосування; основні вигоди, що може отримати користувач товару та чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників;

Таблиця 4.1 Опис ідеї стартап-проекту

<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки застосування</i>	<i>Вигоди для користувача</i>
Комп'ютерно-інтегрована система захоплення руху людини із підвищеною завадостійкістю	1. Медицина	Кількісний аналіз біомеханічних та фізіологічних параметрів тіла людини
	2. Спортивна практика	Покращення фізичних можливостей спортсменів; вдосконалення тренувального процесу; реабілітація після травм
	3. Кінематограф	Створення реалістичної комп'ютерної графіки, що підвищує якість отриманої картини
	4. Доповнена реальність	Створення ефекту присутності у розважальних системах доповненої реальності, підвищуючи зацікавленість користувачів

Висновок: в таблиці приведені основні напрямки застосування запропонованої системи захоплення руху людини. Цими споживачами є медичні заклади дослідження здоров'я опорно-рухового апарату, спортивні заклади із підготовки та реабілітації спортсменів, кінематографічні студії створення тривимірної графіки.

Таблиця 4.2 Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик

№ n/n	Техніко- економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтраль на сторона)	S (сильна сторон а)
		Мій проект	Конкур ент1	Конку рент2	Конку рент3			
1.	Низькі витрати	15	50	35	40			+
2.	Габаритні мм	40*35	20*20	30*35	40*40		+	
3.	Надійність	Система завадост ійкості	-	-	-			+
4	Захищеність	IP67	-	-	IP67			+
5	Технологічність	77%	50%	80%	60%			+

Висновки: у порівнянні із головними конкурентами товар має ряд переваг – це вартість, використання інноваційних систем підвищення надійності та точності. Слід також звернути увагу, що даний товар є технологічним. З точки зору виробництва це дає можливість стабільно отримувати високу якість товару та не нести збитків через неякісне виготовлення. Ставка на захищеність робить запропонований товар майже унікальним.

4.1.1 Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 4.3 Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ n/n	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Підвищення точності роботи	Використання нових датчиків	Наявна	Доступна
2	Підвищення завадостійкості	Впровадження алгоритмів фільтрації та компенсування похибок	Необхідно розробити	Теоретично доступна
3	Інтеграція з іншими системами оцінки біологічної активності людини	Використання готових протоколів обміну даними.	Наявна	Доступна
4	Зменшення масо-габаритних показників	Використання передових технологій виробництва приладів	Наявна	Доступна
5	Сертифікація для використання у медичних закладах	Проходження медичної сертифікації	Наявна	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Ідею створити можна. Технологія реалізації ідеї спирається на інноваційність підходу. Тому для того щоб значно виділятися на ринку від конкурентів, необхідно за основу взяти другий пункт «Підвищення завадостійкості» що потребує значних ресурсів на проведення дослідження та подальшу реалізацію. У поєднанні з сертифікацією розширить сферу використання та подальший прибуток.				

4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Таблиця 4.4 Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Показники стану ринку (найменування)</i>	<i>Характеристика</i>
1	Кількість головних гравців, од	4
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	50000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Сертифікація
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	відсутні
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	43%

Висновки: за результатами складеної таблиці можна сказати, що вихід на ринок є рентабельним. Мала кількість гравців свідчить про високий поріг входу на ринок через високу наукоємність ніші, однак з іншої сторони тут мала конкурентність, що при умові вибору правильного вектору розвитку, може зіграти в плюс проекту. Високий процент рентабельності дає змогу швидко відбити затрачені кошти на розробку системи.

Таблиця 4.5 Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
1	Оцифровка руху живих істот	<ul style="list-style-type: none"> - Медична інженерія - кінематографія спортивна медицина 	Особливості, викликані зі специфікою проведення дослідів, необхідність модифікування програмно-алгоритмічного забезпечення, інтеграція із існуючими системами	<ul style="list-style-type: none"> - Швидкість роботи - Можливість комплексування з іншими системами - Висока стабільність результатів

Висновки: формування ринку визначається потребою оцифровки рухів живих істот та подальший аналіз даних. Основними споживачами цього продукту є сфери, що тією чи іншою мірою стосуються дослідження рухового апарату, а саме сфера медичної інженерії, кі-

нематограф, спортивна медицина. Заважаючи на це, головними вимогами до товару є швидкість роботи, комплексування з іншими приладами, стабільність результатів.

Таблиця 4.6 Фактори загроз

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Конкуренція	Менша ціна у конкурента при однаковій якості продукту	Відтік клієнтів
2	Економічний	Економічний стан країни-виробника	Відмова від продукту
3	Якість	Не належна якість зібраного приладу	Відмова від продукту
4	Вартість комплектуючих	Підвищення закупівельної вартості комплектуючих	Пошук нових постачальників, зміна матеріальної бази
5	Патентні позови	Позови від компаній конкурентів	Відстоювання прав компанії.

Висновки: головним фактором загроз є конкуренція. Вже існуючі товари на ринку мають певну репутацію та великі об'єми виробництва. Конкуренти здатні демпінгувати ціни для отримання нових клієнтів свого товару.

Таблиця 4.7 Фактори можливостей

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Збільшення попиту	Різке збільшення зацікавленості до системи	Підвищення виробництва
2	Необхідність до інтеграції	Необхідність додати можливість розширення системи	Компанія може створити додаткові можливості системи на замовлення
3	Освоєння нових сфер	Система використовується у сферах, що не розглядалися виробником	Створення спеціальної робочої групи задля модернізації приладу для виконання поставлених вимог
4	Індивідуальне замовлення	Клієнт потребує додання нових специфічних додатків	Оцінка затрат і вигоди компанії в даній ситуації. Погодження умов можливого контракту.
5	Співпраця з конкурентами	Конкурент запропонував кооперацію	Оцінки можливих ризиків

Висновки: сфера використання таких систем є молодим, тому ринок клієнтів постійно зростає. Збільшення зацікавленості в товарі призведе до різкого збільшення об'ємів виробництва та продажів, що дасть поштовх до нових вдосконалень. Це досягається шляхом рекламування та освоєння нових сфер використання СЗРЛ.

Таблиця 4.8 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i>
1. Вказати тип конкуренції - чиста конкуренція	Мала кількість постачальників даного продукту	- відповідність ринку - прогнозування - випереджати існуючі технології
2. За рівнем конкурентної боротьби міжнародний	Наявність замовників із інших держав	Міжнародний ринок
3. За галузевою ознакою - міжгалузева	Використання у різних галузях	Робота менеджменту і реклами по залученню клієнтів
4. Конкуренція за видами товарів:- товарно-видова	Товар, що пропонується є одного виду	Клієнтко-орієнтована стратегія розвитку Адаптивність до умов ринку
5. За характером конкурентних переваг - цінова	Вартість залежить від комплектації та функціоналу	Пошук вигідного постачальника компонентів
6. За інтенсивністю - марочна	Вибір постачальника по бренду	Розкрутка бренду, його рекламування

Висновки: на ринку присутня чиста конкуренція через те, що окремі гравці не можуть впливати на ціну товару. За рівнем конкурентної боротьби – міжнародний із міжгалузевою ознакою. Конкуренція за видами товарів – видова.

Таблиця 4.9 Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Xsens InertialLabs ADPM	Vicon MS Kinect	Mouser Digikey Arrow	FCU Клініки Фільмотехніка	Оптичні системи
Висновки:	Конкуренція є відносно не великою	Вихід на ринок відносно простий. Наявні потенційні конкуренти.	Постачальники мають не диктувати ціни на ринку	Клієнти не диктують умови через велику зацікавленість до товару.	Обмежень практично немає, оскільки маю різні обмеження по використанню

Таблиця 4.10 Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Надійність	Використання алгоритмів із підвищеною завадостійкістю
2	Простота	Простота у використанні для користувача робить систему привабливою для клієнта.
3	Адаптивність	Можливість гнучкого налаштування під конкретні задачі
4	Модульність	Можливість комплексування із додатковими системами фіксації біологічних показників.
5	Захищеність	Використання в агресивних середовищах

Висновки: оцінено основні фактори конкурентоспроможності. Підвищення надійності та завадостійкості системи досягається шляхом використання алгоритмів із підвищеною завадостійкістю Простота у використанні приладу та налаштуванні робить його більш привабливим для клієнта через те, що необхідно тратити мінімум часу на налагодження та запуск. Адаптивність та модульність відкривають широкий спектр використання приладу у поєднанні із іншими системами.

Таблиця 4.11 Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з Xsens						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Надійність	18							+3
2	Простота	20			-1				
3	Адаптивність	17						+2	
4	Модульність	16				0			
5	Захищеність	18						+2	

Висновки: спираючись на фактори конкурентоспроможності (Таблиця 4.9) та підсумовуючи рейтинг товару відносно головного конкурента, запропонована система має більший рейтинг відносно прямих конкурентів. Дана таблиця показує якими саме особливостями розроблена система відрізняються від аналогів та в яку саме сторону. Детальний аналіз показує, що сильними сторонами є простота, можливість до адаптації з роботою із іншими системами.

Таблиця 4.12 SWOT- аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. вища завадостійкість 2. простота використання 3. адаптивність 4. стабільна робота, 5. простота використання, 6. портативність, 7. можливість до комплексування 	<p>Слабкі сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. своєчасне оновлення мат. бази, 2. відносно нове ПЗ може мати недоліки
<p>Можливості:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Вихід на міжнародний ринок 2. Збільшення попиту 3. Необхідність до інтеграції 4. Освоєння нових сфер 5. Індивідуальне замовлення 6. Співпраця з конкурентами 	<p>Загрози:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. конкуренція, 2. Економічна нестабільність 3. Якість продукту 4. Вартість комплектуючих 5. Патентні позови 6. сертифікація

Таблиця 4.13 Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Індивідуацізм (максимація власного виграшу)	Середня	7міс
2	Кооперація (максимізація спільного виграшу)	Висока	10міс
3	Суперництво	Нижче середнього	12міс.

Висновки: в результаті аналізу обрано кооперацію, як альтернативну ринкову поведінку через те, що за відносно короткий термін існує велика ймовірність отримання ресурсів.

4.3 Розроблення ринкової стратегії проекту

Таблиця 4.14 Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ n/n	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Спортивна медицина	-	+	низька	+
2	Центри реабілітації	-	+	низька	-
3	Центри дослідження рухового апарату	+	+	низька	+
4	Кінематографія	+	+	висока	+
5	Робототехніка	+	+	низька	-
Які цільові групи обрано: під час вибору цільової групи до уваги бралось в першу чергу готовність споживача сприйняти продукт. Спортивна медицина та центри дослідження потребують більш популярних роз'яснень щодо можливостей використання таких систем. У випадку успішного реклами є можливість зайняти нішу. На даний момент буде важко конкурувати з уже існуючими оптичними СЗРЛ у сфері кінематографії.					

Таблиця 4.15 Визначення базової стратегії розвитку

№ n/n	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
	Індивідуалізм	Стратегія недиференційова ного маркетингу	<ul style="list-style-type: none"> - Адаптація до вимог ринку - Використання новацій - Генерування ноу-хау 	Стратегія спеціалізації

Висновки: обрана стратегія розвитку спеціалізація через існування на ринку більш сильніших гравців. На перших кроках існування проекту доцільніше обрати стратегію спеціалізації та зайняти певну стабільну нішу на ринку.

Таблиця 4.16 Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ n/n	Чи є проект «першопрохідце м» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
	Не є першопрохідцем	Буде шукати нових споживачів із поступовим переманюванням від конкурентів	Компанія буде вдосконалювати наявні зразки	Стратегія виклику лідера

Висновок: оскільки проект не є першопрохідцем та має суттєві переваги по відношенню до свого прямого конкурента, можливо обрати стратегію виклику лідеру. Це є можливим на фоні використання інноваційних методів підвищення точності алгоритмічного забезпечення.

Таблиця 4.17 Визначення стратегії позиціонування

<i>№ n/n</i>	<i>Вимоги до товару цільової аудиторії</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>	<i>Ключові конкурентоспроможні і позиції власного стартап-проекту</i>	<i>Вибір асоціацій, які мають сформувавши комплексну позицію власного проекту (три ключових)</i>
1	Швидкість роботи	Стратегія спеціалізації	До слідження та розвиток	Високошвидкісна, легкість, надійність
2	Можливість комплексування з іншими системами	Стратегія спеціалізації	Обслуговування	Здатна до комплексування
3	Висока стабільність результатів	Стратегія спеціалізації	Якість	високоточна

Висновки: На ряду із використання інноваційних методів підвищення точності, проект повинен викликати асоціації у клієнта у гнучкості налаштування та комплексування, можливості після продажного обслуговування та високої якості виготовлення.

Таблиця 4.18 Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку пропонує товар</i>	<i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i>
	Необхідність оцифровки руху людини	Відносно дешева та надійна система захоплення руху	Ціна, надійність, простота, підтримка, обслуговування, малогабаритність

Висновки: в результаті визначення переваг концепції товару можливо створення цільової реклами товару та донесення цільового повідомлення до кінцевого клієнта.

Таблиця 4.19 Опис трьох рівнів моделі товару

<i>Рівні товару</i>	<i>Сутність та складові</i>		
I. Товар за задумом	Засіб дає можливість користувачеві оцінити відносно положення тіла в просторі. В повній мірі оцифрувати рухи людини, дослідження біомеханіки тіла, вдосконалення процесів реабілітації та діагностики захворювань, впровадження інновацій в спортивній медицині. Відтворення моделі руху людини або тварини для подальшого використання у кінематографі або доповненій реальності.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Малогабаритність	15г	Тх
	2. Швидкість роботи	70Гц	Тх
	3. Точність	0,1° СКВ	Тх
	4. Надійність	IP67	Тх
	5. Вартість	50	Е
	Якість: сертифікати відповідності якості ISO, сертифікація для використання в медичних закладах, сертифікація ІЕЕЕ.		
Пакування			
Марка: Amalthea			
III. Товар із підкріпленням	До продажу Максимальна комплектація, необхідна для замовника		
	Після продажу після продажна підтримка, сервіс, гарантія, сервісне обслуговування		
Захист товару проводиться шляхом патентування приладу, проведення заходів захисту програмного та апаратного забезпечення, .			

Висновки: основними засобами захисту від копіювання є патентування програмних та апаратних рішень, що використовуються у приладі. Окрім того, захист програмного коду повинен запобігти копіювання програми. Закладені характеристики на другому та третьому рівнях товару робить його унікальним серед конкурентів.

Таблиця 4.20 Визначення меж встановлення ціни

<i>№ n/n</i>	<i>Рівень цін на товари- замінники</i>	<i>Рівень цін на товари- аналоги</i>	<i>Рівень доходів цільової групи споживачів</i>	<i>Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу</i>
	90-120 у.о.	50-80 у.о.	1200-2000 у.о.	50-90 у.о.

Висновки: обрано середню цінову категорію, оскільки занадто висока ціна відлякує споживача.

Таблиця 4.21 Формування системи збуту

<i>№ п/п</i>	<i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i>	<i>Глибина каналу збуту</i>	<i>Оптимальна система збуту</i>
	Продаж	Повний супровід товару до замовника	Нульового рівня	Безпосередній (прямий)
	Оренда	Надання консультацій та оренди обладнання	Нульового рівня	Безпосередній (прямий)

Висновки: основними каналами збуту є оренда та продаж. Через відносно не великі об'єми виробництва нема сенсу використовувати підрядників для реалізації товару. Тому обрано нульовий рівень глибини каналу збут та прямої системи збуту.

Таблиця 4.22 Концепція маркетингових комунікацій

<i>№ п/п</i>	<i>Специфіка поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти</i>	<i>Ключові позиції, обрані для позиціонування</i>	<i>Завдання реklamного повідомленн я</i>	<i>Концепція реklamного звернення</i>
	Зовнішні обставини спонукають споживача до пошуку рішення	- Реклама - SMM - сайт виробника	- Високошвид кісна - Легкість - надійність	Донесення можливосте й отримання прибутку за допомогою цього засобу	Показ можливосте й даної системи та можливість застосуванн я

Висновки: Маркетингова комунікація проходить через рекламу приладу в соціальних мережах, спортивних заходах, рекламі комп'ютерних ігор чи кінофільмів. Метою цих оголошень є донесення можливостей даної системи та вигоди від використання. Вся медіа реклама спрямована на створення «вау» - ефекту.

4.4 Висновки

Даний розділ присвячений розробленню першого етапу створення стартап-проекту. Найголовнішим в проведенні будь-якої наукової роботи є подальша комерціалізація отриманих результатів та можливість застосування розробленої концепції в промисловості. Більшість ідей в тій чи іншій мірі впливають на економічну складову підприємства. Тому розроблена ідея може бути використана як бізнес модель та може бути продана зацікавленим особам.

Першим кроком було відбір та висвітлення самої ідеї проекту. Для цього в Таблиця 4.1 приведено назву проекту та можливі зацікавлені сторони, котрі будуть потенційними споживачами продукту та які саме ризики можуть бути під час реалізації. Аналіз слабких та сильних сторін дають можливість автору проекту визначити аспекти, на яких слід зробити ставку. Перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик ідеї дає можливість до уявлення конкурентоспроможності запропонованого рішення. Для даного проекту було обрано виявлено не зайняту нішу товару у сфері спортивної медицини та у медичних закладах. Сильними сторонами проекту являються можливість до інтеграції з іншими приладами та підвищення стійкості та надійності системи.

Наступним кроком проводився технологічний аудит проекту. Під час аудиту автор отримує можливість до розуміння кращої технології виконання. Виявлено що більшість технологій вже існує, однак використання останніх не дасть можливості мати переваги над конкурентами. Саме ставка на інноваційні методи підвищення точності можуть зробити пристрій унікальним та незамінним. Загалом, створення проекту можливе, однак необхідно провести доволі сильну рекламну компанію, щоб отримати покупців.

Зважаючи на стрімкий розвиток технологій, для швидкого отримання ресурсів та прибутків, слід обрати кооперацію, як форму ринкового впровадження проекту. Тобто, для того щоб встигнути за ринком, слід не розроблювати систему з нуля, оскільки це займе доволі багато часу, а запропонувати лідерам ринку використання запропонованих програмних рішень. Звісно, це є альтернативою, оскільки в такому випадку ні одна зі сторін не отримає повного прибутку.

Після аналізу всіх аспектів ринку, подальша імплементація проекту можлива. Але є одна важлива умова. Слід провести доволі сильну рекламну компанію, та донести до споживачів необхідність використання системи саме з підвищеною заводостійкістю та чому саме обрати нашу систему.

ВИСНОВКИ

Головним науковим результатом дисертаційної роботи є обґрунтування та розробка алгоритму оцінки орієнтації із підвищеною завадостійкістю, що використовується в інерціальній системі захоплення руху людини, в підвищені точності роботи системи під час дії магнітних збурень та зменшенню впливу навколишнього середовища на точність роботи системи.

В ході дисертаційної роботи вирішено та виконано такі задачі:

1. Виконаний огляд існуючих систем захоплення руху людини. Виявлено, що найбільш розповсюдженими системами є оптичні через їх велику точність. Однак особливості використання унеможливають роботу із високошвидкісними об'єктами та на відкритій місцевості. Встановлено, що механічні та інерціальні не мають такого недоліку. Механічна система є точною, одна додатковий скелет, що одягається на тіло, обтяжує та унеможливає природність рухів. Встановлено, що найбільш передовими та прогресивними є інерціальні СЗРЛ.

2. Проаналізовано наявні алгоритми оцінки орієнтації датчиків в ГСК, що використовуються в ІВБ. Найбільш розповсюдженими є алгоритми, що використовують Калманівську фільтрацію. Такі методи дозволяють із високою точністю отримати кутове положення, однак потребують великої обраховуючої потужності та налаштування. На противагу цим методам є комплементарні фільтри, котрі є більш «легкими».

3. Обрано базовий алгоритм. Цей алгоритм є ДФОП, запропонований Еріком Бахманом. В процесі моделювання алгоритму виявлено особливість впливу магнітного каналу на точність визначення горизонту. Виявлено, що цей ефект спостерігається через відсутність розділення каналів корекції. Ця особливість накладає певні обмеження та унеможливає використання цього алгоритму.

4. На базі обраного алгоритму задля підвищення завадостійкості при визначенні орієнтації запропоновано методи розділення каналів корекції та обмеження глибини корекції. Також вжиті щодо заходи підвищення динамічної точності. Моделювання модифікованого алгоритму показало, що вжиті заходи нівелюють вплив магнітометричного каналу на визначення положення горизонту. Обмеження корекції дає можливість визначати кут курсу навіть під час сильних магнітних збурень. Динамічна алгоритмічна точність під час дії завади та двовісної качки сягає 0.0017° СКВ.

5. Виконано калібрування датчиків. Визначено параметри вихідного сигналу кожного елемента, що підвищує точність системи. Запропоновано використання позиційно-незалежної калібровки магнітометрів для адаптації під поточне магнітне поле.

6. Розроблено власний макет інерціальної системи захоплення руху людини. Написано програмне забезпечення для БКВ із використанням запропонованого алгоритму орієнтації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Mündermann L. The evolution of methods for the capture of human movement leading to markerless motion capture for biomechanical applications / L. Mündermann, S. Corazza, T. Andriacchi. // BioMed Central. – 2005. – С. 1–11, DOI 10.1186/1743–0003–3–6.
2. Muybridge E. The Human Figure In Motion / Eadweard Muybridge. – Лондон: Chapman & Hall., 1901.
3. US patent 1242674, Max Fleischer, "Method of producing moving-picture cartoons", issued 1917-10-09.
4. Gage J. Gait analysis. An essential tool in the treatment of cerebral palsy. / J. Gage. // NCBI. – 1993. – С. 126–134.
5. Dual Camera Motion Capture for Serious Games in Stroke Rehabilitation / L. Evett, A. Burton, S. Battersby та ін.]. // IEEE Conference: Serious Games and Applications for Health (SeGAH). – 2011, DOI: 10.1109/SeGAH.2011.6165460 .
6. Kinematics Differences Between the Flat, Kick, and Slice Serves Measured Using a Markerless Motion Capture Method / ALISON L. SHEETS, GEOFFREY D. ABRAMS, STEFANO CORAZZA та ін.]. – 2011. – С. 3011–3020, DOI: 10.1007/s10439–011–0418–y.
7. Ergonomic Models of Anthropometry, Human Biomechanics and Operator-Equipment Interfaces: Proceedings of a Workshop, 1988.
8. Система захоплення руху Gypsy [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://metamotion.com/gypsy/gypsy-motion-capture-system-mocap.htm>.
9. VICON [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.vicon.com>.
10. Maletsky L. Accuracy of an optical active-marker system to track the relative motion of rigid bodies / L. Maletsky, J. Sun, N. Morton. // Elsevier BV. – 2007. – С. 682–685. DOI 10.1016/j.jbiomech.2006.01.017.
11. Kinect Sensor [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/hh438998.aspx>.
12. Asus Xtion PRO [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.asus.com/3D-Sensor/Xtion_PRO/.
13. SoftKinetic and Melexis First to Bring 3D Vision to Automobile Infotainment. Enabling driver monitoring as well as gesture recognition to control media. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.melexis.com/en/news/2014/23062014_mlx7502.
14. Motion capture system of magnetic markers using three-axial magnetic field sensor / [S. Yabukami, H. Kikuchi, M. Yamaguchi та ін.]. // IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 36, NO. 5. – 2000. – С. 3646–3648, DOI: 10.1109/20.908928.

15. MOLDENHAUER, J., BOESNACH, I., BETH, T., WANK, V. and BOS, K., [Apr. 2005], Analysis of Human Motion for Humanoid Robots. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. DOI 10.1109/robot.2005.1570137. IEEE.
16. D. Giansanti, V. Macellari, G. Maccioni, and A. Cappozzo. Is it feasible to reconstruct body segment 3-D position and orientation using accelerometric data? IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 50(4):476–83, 2003.
17. Zhao N. Full-Featured Pedometer Design Realized with 3-Axis Digital Accelerometer / Neil Zhao. // Analog Dialogue. – 2010. – №44. – C. 1–5.
18. Y. Masuda, M. Sekimoto, M. Nambu, Y. Higashi, T. Fujimoto, K. Chihara, and Y. Tamura, “An unconstrained monitoring system for home rehabilitation,” IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, vol. 24, no. 4, pp. 43–47, 2005.
19. D. Vlasic, R. Adelsberger, G. Vannucci, J. Barnwell, M. Gross, W. Matusik, and J. Popovic, “Practical motion capture in everyday ‘ surroundings,” ACM Trans. on Graphics, vol. 26, no. 3, p. 35, 2007.
20. Kinematics Differences Between the Flat, Kick, and Slice Serves Measured Using a Markerless Motion Capture Method, 2011.
21. Important step forward for gait analysis of horses [Электронный ресурс] // University of Copenhagen – Режим доступа до ресурсу: <https://phys.org/news/2013-08-important-gait-analysis-horses.html>.
22. Inertial sensor-based knee flexion/extension angle estimation / [G. Cooper, I. Sheret, L. McMillian та ін.]. // Elsevier BV. – 2009. – C. 2678–2685. DOI 10.1016/j.jbiomech.2009.08.004.
23. Joukov V. Online Tracking of the Lower Body Joint Angles using IMUs for Gait Rehabilitation / V. Joukov, M. Karg, D. Kulic. // IEEE. – 2014. – №36. – C. 2310–2313, DOI 10.1109/embc.2014.6944082.
24. Roetenberg D. Xsens MVN: Full 6DOF human motion tracking using miniature inertial sensors / D. Roetenberg, H. Luinge, P. Slycke. // XSENS TECHNOLOGIES. – 2013. – C. 1–9.
25. C. Chen. A survey of depth and inertial sensor fusion for human action recognition / C. Chen, R. Jafari, N. Kehtarnavaz. // Multimedia Tools and Applications, February 2017, Volume 76, Issue 3. – 2015. – C. 4405–4425, DOI 10.1007/s11042–015–3177–1.
26. Brodie M. Fusion motion capture: a prototype system using inertial measurement units and GPS for the biomechanical analysis of ski racing / M. Brodie, A. Walmsley, W. Page. // Informa UK Limited. – 2008. – C. 17–28.
27. Seel T. IMU-Based Joint Angle Measurement for Gait Analysis / T. Seel, J. Raisch, T. Schauer. // MDPI AG. – 2014. – C. 6891–6909. DOI 10.3390/s140406891.

28. Технічна документація MTi 1-серії [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.xsens.com/products/mti-1-series/>.
29. Технічна документація Xsens MYi 100-series [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.xsens.com/products/mti-10-series/>.
30. IEEE Wireless communication standart [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://standards.ieee.org/findstds/standard/802.15.4v-2017.html>.
31. MTw wireless motion tracker. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.xsens.com/products/mtw-awinda/>.
32. Xsens is the exclusive integration partner for Vivelab Ergo [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.xsens.com/mvn-integrations/#vivelab>.
33. Augmenting Low-cost GPS/INS with Ultra- Wideband Transceivers for Multi-platform Relative Navigation / [A. Vydhyathan, H. Luinge, M. Tanigawa та ін.]. // 22nd International Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. – 2009. – С. . 547-554.
34. MTw Awinda Wireless Motion Tracker [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.xsens.com/products/mtw-awinda/>.
35. 3DSuit Motion Capture System [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://inertiallabs.com/3dsuit.html>.
36. 3DSuit Specifications [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://inertiallabs.com/static/pdf/Inertial_Labs_3DSuit_Datasheet_rev1.2_March_2015.pdf.
37. 3DSuit Inertial Motion Capture Systems for Biomechanical, Sports Science and Rehabilitation Applications [Електронний ресурс] // 3DSuit Motion Capture System, White paper. – 2012. – Режим доступу до ресурсу: https://inertiallabs.com/static/pdf/3DSuit_Inertial_Motion_Capture_Systems_for_Biomechanical_Applications_March_2012.pdf.
38. 3DSuit® Motion Capture System [Електронний ресурс] // InertialLabs. – 2012. – Режим доступу до ресурсу: https://inertiallabs.com/static/pdf/Inertial_Labs_3DSuit_User_Manual_Ver1.2_July_2014.pdf.
39. Validity and repeatability of inertial measurement units for measuring gait parameters / [E. Washabaugh, T. Kalyanaraman, P. Adamczyk та ін.]. // Elsevier BV, Gait & Posture. 2017. Vol. 55. – 2016. – С. 87–93, DOI 10.1016/j.gaitpost.2017.04.013.
40. Mancini M. Potential of APDM Mobility Lab for the monitoring of the progression of Parkinson's disease / M. Mancini, F. Horak. // Informa UK Limited. – 2016. – С. 455–462. DOI 10.1586/17434440.2016.1153421.

41. Dual-task gait differences in female and male adolescents following sport-related concussion / D.Howell, A. Stracciolini, E. Geminiani, W. Meehan. // Elsevier BV. – 2017. – С. 284–289, DOI 10.1016/j.gaitpost.2017.03.034.
42. Inertial measures of motion for clinical biomechanics: comparative assessment of accuracy under controlled conditions - effect of velocity. / K.Lebel, P. Boissy, M. Hamel, C. Duval. // Public Library of Science (PLOS). – 2013. – С. e79945. DOI 10.1371/journal.pone.0079945.
43. A simple test to assess the static and dynamic accuracy of an inertial sensors system for human movement analysis / Andrea G. Cutti, A. Giovanardi, L. Rocchi, A. Davalli. – 2006. – №28. – С. 5912–5915, DOI: 10.1109/IEMBS.2006.260705.
44. PERCEPTION NEURON [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://neuronmocap.com/products/perception_neuron.
45. A Low-cost and Light-weight Motion Tracking Suit / Sarvenaz Salehi, Gabriele Bleser, Norbert Schmitz, Didier Stricker. // IEEE 10th International Conference on Ubiquitous Intelligence & Trusted Computing. – 2013. – С. 474–479, DOI 10.1109/UIC-ATC.2013.22.
46. A. H. Jazwinski. Stochastic Processes and Filtering Theory / A. H. Jazwinski., 1970.
47. Zheng Y. Pedalvatar: An IMU-Based Real-Time Body Motion Capture System Using Foot Rooted Kinematic Model / Y. Zheng, C. Ka-Chun, W. Charlie. // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2014). – 2014. – С. 4130–4135,. DOI: 10.1109/IROS.2014.6943144.
48. Inertial Motion Capture Costume Design Study / [A. Szczesna, P. Skurowski, E. Lach та ін.]. // MDPI AG. – 2017. – С. 612–633. DOI 10.3390/s17030612.
49. Development of an Inertial Motion Capture System for Clinical Application / [G. Bleser, B. Taetz, M. Miezal та ін.]. // De Gruyter, i-com - Journal of Interactive Media, vol.16. – 2017. – С. 113–129, DOI 10.1515/icom-2017-0010.
50. Madgwick S. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays / Sebastian Madgwick. – 2010. – С. 1–32.
51. Мелешко В.В., Нестеренко О.І. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы. Учебное пособие. – Кировград: ПОЛИМЕД-СЕРВИС, 2011. – С.111-124.
52. A Least Squares Estimate of Satellite Attitude (Grace Wahba) / [L. Farrell, C. Stuelpnagel, R. Wessner та ін.]. // Society for Industrial & Applied Mathematics (SIAM). – 1966 – С. 384–386. DOI 10.1137/1008080.
53. Shuster. Three-axis attitude determination from vector observations / Shuster, Oh. // American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA). – 1981. – С. 70–77. DOI 10.2514/3.19717.

54. A New Quaternion-Based Kalman Filter for Real-Time Attitude Estimation Using the Two-Step Geometrically-Intuitive Correction Algorithm / K. Feng, J. Li, X. Zhang та ин.]. // MDPI. – 2017. – С. 1–21, 10.3390/s17092146.
55. Ивойлов А. О применении МЭМС-датчиков при разработке системы автоматической стабилизации двухколесного робота / А. Ивойлов. // Сборник научных трудов НГТУ. – 2017. – №3. – С. 32–51.
56. Crassidis J. Survey of Nonlinear Attitude Estimation Methods / J. Crassidis, L. Markley, Y. Cheng. // Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 30, No. 1. – 2007. – С. 12–28, DOI 10.2514/1.22452.
57. Bishop G. An Introduction to the Kalman Filter / G. Bishop, G. Welch. // UNC-Chapel Hill. – 2006. – С. 1–16.
58. Yun X. Design, Implementation, and Experimental Results of a Quaternion-Based Kalman Filter for Human Body Motion Tracking / X. Yun, E. Bachmann. // IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS, VOL. 22, NO. 6. – 2006. – С. 1216–1227, DOI 10.1109/TRO.2006.886270.
59. Sabatini A. Quaternion-Based Extended Kalman Filter for Determining Orientation by Inertial and Magnetic Sensing / Angelo Sabatini. // IEEE. – 2006. – С. 1346–1356, DOI 10.1109/TBME.2006.875664.
60. Survey of Motion Tracking Methods Based on Inertial Sensors: A Focus on Upper Limb Human Motion / [A. Filippeschi, N. Schmitz, M. Miezal та ин.]. // MDPI AG. – 2017. – С. 1257. DOI 10.3390/s17061257.
61. Rong Zhu. A Real-Time Articulated Human Motion Tracking Using Tri-Axis Inertial/Magnetic Sensors Package / Rong Zhu, Zhaoying Zhou. // IEEE TRANSACTIONS ON NEURAL SYSTEMS AND REHABILITATION ENGINEERING. – С. 295–302, DOI 10.1109/TNSRE.2004.827825.
62. Young A. Use of Body Model Constraints to Improve Accuracy of Inertial Motion Capture / A. Young. // International Conference on Body Sensor Networks, IEEE. – 2010. – С. DOI 10.1109/bsn.2010.30.
63. Bleser G. Using Egocentric Vision to Achieve Robust Inertial Body Tracking under Magnetic Disturbances / G. Bleser, G. Hendeby, M. Miezal. // IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality. – 2011. – С. 103–109, . DOI: 10.1109/ISMAR.2011.6092528.
64. A novel 7 degrees of freedom model for upper limb kinematic reconstruction based on wearable sensors / L. Peppoloni, A. Filippeschi, E. Ruffaldi, C. A. Avizzano. // 2013 IEEE 11th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY). – С. 105–110, DOI 10.1109/SISY.2013.6662551.

65. Werries A. Adaptive Kalman Filtering Methods for Low-Cost GPS/INS Localization for Autonomous Vehicles [Електронний ресурс] / A. Werries, J. Dolan // Carnegie Mellon University. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <http://repository.cmu.edu/robotics/1185/>.
66. L. Csanky. Fast Parallel Matrix Inversion Algorithms / L. Csanky. // SIAM Journal on Computing. – С. 618–623. doi 10.1137/0205040.
67. Experimental comparison of Kalman and complementary filter for attitude estimation / P. Perez, J. Redolfi, D. Gaydou, L. Canali. // Conference: Argentine Symposium on Technology - AST. – 2011. – С. 1–11.
68. Brückner H. Exploring Energy Efficiency of Hardware-Architectures for IMU Based Orientation Estimation / H. Brückner, C. Spindeldreier, H. Blume. // Smart Sensors, Measurement and Instrumentation 11. – 2015. – С. 157–178, DOI: 10.1007/978-3-319-10948-0_8.
69. Mahony R. Nonlinear Complementary Filters on the Special Orthogonal Group / R. Mahony, T. Hamel, J. Pflimlin. // IEEE Transactions on Automatic Control Volume: 53, Issue: 5. – 2008. – С. 1203 – 1218, DOI: 10.1109/TAC.2008.923738.
70. Valenti R. Keeping a Good Attitude: A Quaternion-Based Orientation Filter for IMUs and MARGs / R. Valenti, I. Dryanovski, J. Xiao. // MDPI AG. – 2015. – С. 19302–19330. DOI 10.3390/s150819302.
71. An extended Kalman filter for quaternion-based orientation estimation using MARG sensors / J. L. Marins, X. Yun, E. Bachmann та ін.]. // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. – 2001. – С. 2003–2011, DOI: 10.1109/IROS.2001.97.
72. Fourati H. Complementary Observer for Body Segments Motion Capturing by Inertial and Magnetic Sensors / H. Fourati, N. Manamanni. // IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, VOL. 19, NO. 1. – 2014. – С. 149–157, DOI: 10.1109/TMECH.2012.2225151.
73. Bachmann R. Inertial and magnetic tracking of limb segment orientation for inserting humans into synthetic environments : дис. докт. філос. наук / Bachmann Robert – Monterey, California, 2000. – 178 с.
74. Мелешко В. Бесплатформенные и навигационные системы / В. Мелешко, О. Нестеренко. – Киев: Политехсервис, 2011.
75. Одинцов А. Ориентация объектов в магнитном поле земли / А. Одинцов, В. Мелешко, А. Шаров. – Киев: Корнийчук, 2008. – 151 с.
76. Henault G. A Computer Simulation Study And Component Evaluation For A Quaternion Filter For Sourceless Tracking Of Human Limb Segment Motion / G. Henault, J. Falby, R. McGhee. // Naval Postgraduate School. – 1997.

77. Лазарев Ю. Ф. ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ АЛГОРИТМОВ БИСО / Лазарев Ю. Ф, Аксененко П. М, Мураховский С. А. // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія ПРИЛАДОБУДУВАННЯ.. – 2016. – С. 10–15.

78. ПОБУДОВА КУРСОВЕРТИКАЛІ З РОЗДІЛЕННЯМ КАНАЛІВ КОРЕКЦІЇ. ЧАСТИНА 1: ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗДІЛЕННЯ КАНАЛІВ КОРЕКЦІЇ.

79. Yadav N. Accurate Orientation Estimation Using AHRS under Conditions of Magnetic Distortion / N. Yadav, C. Bleakley. // MDPI. – 2014. – С. 20008–20024, DOI:10.3390/s141120008.

80. Гордеев В. Кватернионы и трехмерная геометрия [Учебное пособие] / В. Гордеев - Киев.

81. Специфікація акселерометра ADXL345 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Accelerometer/ADXL345.pdf>.

82. Новітні прилади орієнтації та навігації [лабораторний практикум]/ Київ - НТУУ КПІ // 2012.

83. A non-linear, two-step estimation algorithm for calibration solid-state strapdown magnetometers [Електронний ресурс] / D. Gebre-Egziabher, G. H. Elkaim, J. D. Powell, B. W. Parkinson – Режим доступу до ресурсу: <https://web.stanford.edu/group/scpnt/gps>.

84. Стаття ельконф.

ДОДАТКИ